

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Fabrication mécanique et productique
Thème :

Étude et conception d'un mini drone à voilure fixe
Réalisation de l'aile du mini drone

Proposé et dirigé par :

M. MAGRAOUI Rabah

M. BENKHROUF Toufik

Présenté par :

MAHAMOUD Adel

BEKHIT Yousra

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires tout au long de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à nos parents, véritables piliers de notre parcours, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur confiance tout au long de nos années d'études.

*Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à **M. MAGRAOUI Rabah**, notre encadrant universitaire au **département de mécanique**, pour sa disponibilité et ses conseils avisés, qui ont grandement contribué à l'orientation et à la réussite de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à notre co-encadrant, **M. BENKHROUF Toufik**, pour la qualité de son accompagnement, son écoute attentive, ainsi que pour les conseils précieux qu'il nous a apportés tout au long de ce travail.*

*Nous remercions également l'ensemble de l'équipe du **CRD CFA de Dar El Beïda** pour leur accueil chaleureux, leur encadrement rigoureux et les moyens techniques mis à notre disposition dans le cadre de ce projet.*

*Nous remercions tout particulièrement **M. LASKRI Noureddine** pour son professionnalisme et les orientations pertinentes qu'il a su nous offrir à chaque étape de notre travail.*

*Nous exprimons aussi notre profonde reconnaissance à **M. OUALI Mohammed** pour ses orientations éclairées et ses conseils précieux, qui ont été d'un grand soutien durant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants du **département de mécanique**, qui nous ont accompagnés et formés tout au long de notre parcours. Leur engagement pédagogique, leur disponibilité et la qualité de leur enseignement ont joué un rôle essentiel dans notre formation.*

*Enfin, nous adressons un salut amical et reconnaissant à tous nos camarades de la **promotion Ingénieur 2025**, avec qui nous avons partagé des moments riches en apprentissages, en entraide et en souvenirs inoubliables.*

Dédicace

*Je dédie ce travail à **mes parents**, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur foi en mes capacités. Ce projet est le fruit de leur soutien permanent*

*À mes deux frères, **Oussama** et **Haïthem**, pour leur présence, leur affection et leurs encouragements constants.*

*À ma **grand-mère**, spécialement, pour son amour, ses prières et sa bienveillance inépuisable.*

*À toute ma **famille**, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur confiance en moi.*

À mes amis, pour leur écoute, leur patience et leur présence tout au long de ce chemin.

À ceux qui ont été une source d'inspiration, de soutien et de motivation tout au long de ce parcours.

Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci à vous.

BEKHIT

Yousra

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices quotidiens et leur confiance sans faille. Leur soutien, leur patience et leur dévouement ont été les piliers de mon parcours. Rien de tout cela n'aurait été possible sans eux.

À mes sœurs, Akila et Nassima, dont l'affection, la bienveillance et les encouragements m'ont accompagné dans les moments de doute comme dans les instants de réussite. Leur présence m'a toujours été précieuse.

À mes amis, pour leur fidélité, leur écoute sincère et leur présence réconfortante tout au long de cette aventure académique et personnelle.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, m'ont inspiré, soutenu ou motivé, et qui ont, par leurs gestes, leurs mots ou leur simple présence, contribué à la réalisation de ce projet.

À vous tous, je dis merci, du fond du cœur.

MAHAMOUD

ADEL

Abstract

This project focuses on reverse engineering, modeling, and vibrational analysis of a half-wing of a fixed-wing mini-drone. The main objective is to identify natural frequencies and deformation modes to anticipate resonance risks.

After scanning the complete drone using 3D scanning, a CAD model was created with SolidWorks. Manufacturing was limited to the half-wing, made of composite materials. Modal analysis was carried out using three approaches : theoretical (beam model), experimental (FRF using PUMA and CATSMODAL), and numerical (simulation with ABAQUS).

The results showed good agreement between measurements and simulations, validating the methods used.

Keywords : drone, reverse engineering, numerical simulation, modal analysis.

ملخص

يركز هذا المشروع على الهندسة العكسية، النمذجة، والتحليل الاهتزازي لنصف جناح طائرة بدون طيار صغيرة ذات جناح ثابت. الهدف الرئيسي هو تحديد الترددات الذاتية وأنماط التشوه للتنبؤ بمخاطر الرنين.

بعد مسح الطائرة كاملة باستخدام المسح ثلاثي الأبعاد، تم إنشاء نموذج CAO باستخدام برنامج SolidWorks. اقتصر التصنيع على نصف الجناح المصنوع من مواد مركبة.

تم إجراء التحليل النموذجي باستخدام ثلاث طرق: نظرية (نموذج العارضة)، تجريبية باستخدام دالة الاستجابة الترددية

(CATSMODAL و PUMA) و رقمية (باستخدام محاكاة ABAQUS)

أظهرت النتائج توافقاً جيداً بين القياسات والمحاكاة، مما يؤكد صحة الطرق المستخدمة.

الكلمات المفتاحية : طائرة بدون طيار، الهندسة العكسية، المحاكاة الرقمية، التحليل النموذجي.

Résumé

Ce projet porte sur la rétro-ingénierie, la modélisation et l'analyse vibratoire d'une demi-aile de mini-drone à voilure fixe. L'objectif principal est d'identifier les fréquences propres et les modes de déformation afin d'anticiper les risques de résonance.

Après numérisation du drone complet par scan 3D, une modélisation CAO a été réalisée sous SolidWorks. La fabrication s'est limitée à la demi-aile, conçue en matériaux composites. L'analyse modale a été conduite selon trois approches : théorique (modèle poutre), expérimentale (FRF via PUMA et CATSMODAL) et numérique (simulation sous ABAQUS).

Les résultats ont montré une bonne cohérence entre mesures et simulations, validant les méthodes utilisées.

Mots clés : drone, rétro-ingénierie, simulation numérique, analyse modale.

Sommaire

LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	
PROBLÉMATIQUE	
PRÉSENTATION DU LIEU DE STAGE	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : Bases Et Fondamentaux Des Drones

I INTRODUCTION	4
1.1 DEFINITION DE DRONE.....	4
1.2 CLASSIFICATION DES DRONES.....	5
1.3 COMPARAISON ENTRE LES DRONES MULTI-ROTORS ET LES DRONES À VOILURE FIXE.....	6
1.3.1 DÉFINITION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	6
1.3.2 DRONES MULTI-ROTORS	7
1.3.3 DRONES À VOILURE FIXE	7
1.4 LA STRUCTURE PRINCIPALE D'UN DRONE À VOILURE FIXE	8
1.4.1 LE FUSELAGE	8
1.4.2 LES AILES.....	8
1.4.3 L'EMPENNAGE	8
1.5 PROFIL D'AILE	9
1.5.1 DEFINITION	9
1.5.2 CARACTERISTIQUES.....	9
1.6 LES FAMILLES DE PROFILS UTILISEES POUR LES DRONES A VOILURE FIXE	10
1.6.1 PROFILS CONVEXES	10
1.6.2 PROFILS BICONVEXES DISSYMETRIQUES.....	11
1.6.3 PROFILS SYMETRIQUES	11
1.6.4 PROFILS SUPERCRITIQUES.....	11
1.7 CONCLUSION	12

CHAPITRE II : Rétroconception Modélisation Et Fabrication

II INTRODUCTION	13
2.1 DEFINITION	13
2.2 PRINCIPES DE L'INGENIERIE INVERSEE.....	14
2.3 DOMAINES D'APPLICATION DE L'INGENIERIE INVERSEE	14
2.4 METHODOLOGIE DE L'INGENIERIE INVERSEE	15
2.4.1 ACQUISITION DES DONNÉES	15
2.4.2 ANALYSE ET DÉCOMPOSITION.....	15

Sommaire

2.4.3	Modélisation	16
2.4.4	Validation et amélioration	16
2.5	Avantages de l'ingénierie inversée	16
2.6	Enjeux et limites de l'ingénierie inversée	17
2.7	Apport du scan 3D à la rétro-ingénierie	17
2.8	Catégories de scanners 3D	17
2.9	Numérisation 3D et ingénierie inversée	20
2.9.1	Analyse et décomposition	20
2.9.2	Scanner portable noir (Handy Scan Black)	21
2.9.3	Processus de scan	21
2.9.4	Opérations de la numérisation 3D	23
2.9.5	Post-traitement des données	25
2.10	Conception des composants du drone	26
2.10.1	Introduction au logiciel utilisé : SolidWorks	26
2.10.2	Conception des ailes	27
2.10.3	Conception du fuselage :	31
2.10.4	Conception de l'empennage	32
2.10.5	Assemblage et modèle Final	33
2.11	Réalisation de la demi-aile du mini drone	34
2.11.1	Matériaux composites utilisés pour la fabrication de la demi-aile	34
2.11.2	Le procédé utilisé (Méthode combinée : moulage au contact + moulage sous vide)	35
2.11.3	Découpe de la demi-aile	37
2.11.4	Fabrication de la demi-aile	42
2.12	Conclusion	53

CHAPITRE III : Analyse Modale

III	INTRODUCTION	54
3.1	NOTIONS DE BASE VIBRATIONS	54
3.1.1	DEFINITION	54
3.1.2	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES VIBRATIONS	55
3.2	ANALYSE MODALE	55
3.3	ANALYSE MODALE THEORIQUE	56
3.3.1	Hypothèses et modélisation	57
3.3.2	Propriétés mécaniques de la poutre	57
3.3.3	Formulation des fréquences propres	57
3.3.4	Application numérique	58
3.4	ANALYSE MODALE EXPERIMENTALE	58
3.4.1	Principe de mesure	59
3.4.2	Fonction de réponse en fréquence (FRF)	59

Sommaire

3.4.3 Matériel utilisé	60
3.4.4 Acquisition et traitement des données	62
3.4.5 Logiciels utilisés	62
3.4.6 Fixation et Discrétisation de la demi-aile.....	63
3.4.7 Réglage des paramètres d'acquisition sur PUMA	63
3.4.8 Excitation et mesure de la réponse	66
3.4.9 Détermination des paramètres modaux par CATSMODAL	71
3.4.10 Les déformés modales	76
3.5 ANALYSE MODALE NUMERIQUE (SIMULATION NUMERIQUE).....	77
3.5.1 Choix du logiciel de simulation	77
3.5.2 Implémentation d'un modèle numérique	78
3.5.3 Le maillage	78
3.5.4 Comportement mécanique du matériau composite	79
3.5.5 Mise en données du problème.....	79
3.6 ANALYSE COMPARATIVE.....	85
3.7 VALIDATION EXPERIMENTALE DES RESULTATS SUR LA DEMI-AILE	86
3.7.1 Objectif.....	86
3.7.2 Matériel utilisé	86
3.7.3 Préparation de l'essai	87
3.7.4 Excitation de la structure	88
3.7.5 Visualisation des formes modales	88
3.7.6 Enregistrement et analyse des données	89
3.8 Conclusion	90
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	91

CHAPITRE I : Bases Et Fondamentaux Des Drones

FIGURE 1. 1: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES D'UN PROFIL D'AILE [6].....	9
FIGURE 1. 2: PROFILS CONVEXE [5]	10
FIGURE 1. 3: PROFILS BICONVEXES DISSYMETRIQUES [5]	11
FIGURE 1. 4: PROFILS SYMETRIQUES [5].....	11
FIGURE 1. 5: PROFILS SUPERCRITIQUES [5]	12
FIGURE 1. 6: PROFILS A DOUBLE CAMBRURE (AUTOSTABLE)[5]	12

CHAPITRE II : Rétroconception Modélisation Et Fabrication

FIGURE 2. 1: L'INGENIERIE DIRECTE ET L'INGENIERIE INVERSEE [12].....	14
FIGURE 2. 2: UN SCANNER 3D DE BUREAU AVEC TABLE TOURNANTE AUTOMATIQUE [3]	18
FIGURE 2. 3: VARIETE DE SCANNERS 3D PORTABLES [3]	19
FIGURE 2. 4: SCANNER CORPOREL 3D [3]	19
FIGURE 2. 5: MINI DRONE A VOILURE FIXE MONO POUTRE EN V	20
FIGURE 2. 6: SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU MINI DRONE [4].....	21
FIGURE 2. 7: ÉTAPE D'ETALONNAGE REUSSIE DU SYSTEME DE NUMERISATION.....	22
FIGURE 2. 8: MONTAGE DES CIBLES	23
FIGURE 2. 9: NUMERISATION 3D D'UN DRONE A VOILURE FIXE.....	24
FIGURE 2. 10: VERIFICATION DES ZONES MAL CAPTUREES	24
FIGURE 2. 11: VISUALISATION DU MODELE STL AVANT TRAITEMENT CAO.....	26
FIGURE 2. 12: MAILLAGE 3D DE LA DEMI-AILE APRES LA NUMERISATION	27
FIGURE 2. 13: DECOUPE PAR PLANS MULTIPLES	28
FIGURE 2. 14: DECOUPE PAR PLANS MULTIPLES	28
FIGURE 2. 15: AJUSTEMENT DES CONTOURS.....	29
FIGURE 2. 16: AJUSTER LA SPLINE.....	29
FIGURE 2. 17: APPLICATION DU LISSAGE.....	30
FIGURE 2. 18: MODELISATION 3D DE LA DEMI-AILE DU MINI DRONE.....	30
FIGURE 2. 19: MODELISATION 3D DE FUSELAGE DU MINI DRONE.....	31
FIGURE 2. 20: MODELISATION 3D DE LA POUTRE DU MINI DRONE	32
FIGURE 2. 21: MODELE 3D DE L'EMPENNAGE	32
FIGURE 2. 22: ASSEMBLAGE 3D DU MINI DRONE.....	33
FIGURE 2. 23: TISSU DE VERRE [9]	34
FIGURE 2. 24: TISSU DE CARBONE [8].....	34

Listes des Figure

FIGURE 2. 25: TISSU KEVLAR BALISTIQUE.....	35
FIGURE 2. 26: PRINCIPE DU MOULAGE AU CONTACT [11].....	36
FIGURE 2. 27: SCHEMA DU PROCEDE DE MOULAGE SOUS VIDE [11].....	36
FIGURE 2. 28: MATERIAUX SANDWICHES A AMES PLEINES [7].....	37
FIGURE 2. 29: IMPORTATION DES PROFILS EN FORMAT DXF SUR DEVFOAM	38
FIGURE 2. 30: L'ALIGNEMENT DES PROFILS	38
FIGURE 2. 31: GUIDAGE POUR LA DECOUPE	39
FIGURE 2. 32: GENERATION DU G-CODE ET SIMULATION DE DECOUPE.....	40
FIGURE 2. 33: IMPORTATION DU G-CODE POUR COMMENCER LA DECOUPE	41
FIGURE 2. 34: PREPARATION DE LA DECOUPE.....	42
FIGURE 2. 35: LA DECOUPE DES NERVURES.....	43
FIGURE 2. 36: RAINURAGE DE LA MOUSSE	44
FIGURE 2. 37: PREPARATION DU LONGERON.....	44
FIGURE 2. 38: FIXATION DU FOURREAU AVEC LE LONGERON	45
FIGURE 2. 39: POSITIONNEMENT DU LONGERON ET APPLICATION DE MOUSSE EXPANSIVE	46
FIGURE 2. 40: MISE EN PLACE DE LA NERVURE FINALE DANS LA STRUCTURE DE LA DEMI-AILE.....	47
FIGURE 2. 41: DECOUPE PRECISE DES TISSUS POUR STRATIFICATION	48
FIGURE 2. 42: PREPARATION DE LA RESINE	48
FIGURE 2. 43: ORIENTATION DE CRAVATE.....	49
FIGURE 2. 44: APPLICATION SUCCESSIVE DES COUCHES.....	50
FIGURE 2. 45: ÉTAT FINAL DES COUCHES COMPOSITES.....	50
FIGURE 2. 46: TRANSFERT DE LA STRATIFICATION SUR LA MOUSSE	51
FIGURE 2. 47: FIN DE L'OPERATION DE STRATIFICATION.....	51
FIGURE 2. 48: MISE EN PLACE DU SYSTEME SOUS VIDE	52
FIGURE 2. 49: DEMI-AILE FINALE APRES FABRICATION	53

CHAPITRE III : Analyse Modale

FIGURE 3. 1: CHAINE DE MESURE DE VIBRATION [5]	59
FIGURE 3. 2: MARTEAU ET EMBOUTS	60
FIGURE 3. 3: ACCELEROMETRE	61
FIGURE 3. 4: PLATEFORME SPECTRALE DYNAMIQUE.....	62
FIGURE 3. 5: FIXATION ET DISCRETISATION DE LA DEMI-AILE.....	63
FIGURE 3. 6: PARAMETRES D'ACQUISITION DE CONFIGURATION PUMA.....	64
FIGURE 3. 7: REGLAGE DES PARAMETRES DE CHANEL	64

Listes des Figure

FIGURE 2. 25: TISSU KEVLAR BALISTIQUE.....	35
FIGURE 2. 26: PRINCIPE DU MOULAGE AU CONTACT [11].....	36
FIGURE 2. 27: SCHEMA DU PROCEDE DE MOULAGE SOUS VIDE [11].....	36
FIGURE 2. 28: MATERIAUX SANDWICHES A AMES PLEINES [7].....	37
FIGURE 2. 29: IMPORTATION DES PROFILS EN FORMAT DXF SUR DEVFOAM	38
FIGURE 2. 30: L'ALIGNEMENT DES PROFILS	38
FIGURE 2. 31: GUIDAGE POUR LA DECOUPE	39
FIGURE 2. 32: GENERATION DU G-CODE ET SIMULATION DE DECOUPE.....	40
FIGURE 2. 33: IMPORTATION DU G-CODE POUR COMMENCER LA DECOUPE	41
FIGURE 2. 34: PREPARATION DE LA DECOUPE.....	42
FIGURE 2. 35: LA DECOUPE DES NERVURES.....	43
FIGURE 2. 36: RAINURAGE DE LA MOUSSE	44
FIGURE 2. 37: PREPARATION DU LONGERON.....	44
FIGURE 2. 38: FIXATION DU FOURREAU AVEC LE LONGERON	45
FIGURE 2. 39: POSITIONNEMENT DU LONGERON ET APPLICATION DE MOUSSE EXPANSIVE	46
FIGURE 2. 40: MISE EN PLACE DE LA NERVURE FINALE DANS LA STRUCTURE DE LA DEMI-AILE .	47
FIGURE 2. 41: DECOUPE PRECISE DES TISSUS POUR STRATIFICATION	48
FIGURE 2. 42: PREPARATION DE LA RESINE	48
FIGURE 2. 43: ORIENTATION DE CRAVATE	49
FIGURE 2. 44: APPLICATION SUCCESSIVE DES COUCHES	50
FIGURE 2. 45: ÉTAT FINAL DES COUCHES COMPOSITES.....	50
FIGURE 2. 46: TRANSFERT DE LA STRATIFICATION SUR LA MOUSSE	51
FIGURE 2. 47: FIN DE L'OPERATION DE STRATIFICATION.....	51
FIGURE 2. 48: MISE EN PLACE DU SYSTEME SOUS VIDE	52
FIGURE 2. 49: DEMI-AILE FINALE APRES FABRICATION	53

CHAPITRE III : Analyse Modale

FIGURE 3. 1: CHAINE DE MESURE DE VIBRATION [5].....	59
FIGURE 3. 2: MARTEAU ET EMBOUTS.....	60
FIGURE 3. 3: ACCELEROMETRE	61
FIGURE 3. 4: PLATEFORME SPECTRALE DYNAMIQUE	62
FIGURE 3. 5: FIXATION ET DISCRETISATION DE LA DEMI-AILE	63
FIGURE 3. 6: PARAMETRES D'ACQUISITION DE CONFIGURATION PUMA.....	64
FIGURE 3. 7: REGLAGE DES PARAMETRES DE CHANEL.....	64

Listes des Figure

FIGURE 3. 8: PANNEAU DE CONTROLE	65
FIGURE 3. 9: REGLAGE DES PARAMETRES DE TEST	65
FIGURE 3. 10: REGLAGE DE L'ARMEMENT (MARTEAU D'IMPACT).....	65
FIGURE 3. 11: REGLAGE DE DEGRE DE LIBERTE	65
FIGURE 3. 12: SIGNAL D'EXCITATION	66
FIGURE 3. 13: SIGNAL DE LA REPONSE.....	67
FIGURE 3. 14: SIGNAL DE FONCTION DE REPONSE EN FREQUENCE	67
FIGURE 3. 15: L'EXCITATION ET LA REPONSE DU 2EME POINT	68
FIGURE 3. 16: COURBE DE FONCTION DE REPONSE EN FREQUENCE DU 2EME POINT	69
FIGURE 3. 17: COURBE DE FONCTION DE REPONSE EN FREQUENCE DU 8EME ET 13EME POINT ..	69
FIGURE 3. 18 : COURBE DE FONCTION DE REPONSE EN FREQUENCE DU 18EME ET 21EME POINT	70
FIGURE 3. 19: COURBE DE FONCTION DE REPONSE EN FREQUENCE DU 24EME ET 26EME POINT	70
FIGURE 3. 20: LES FRFs DES 28 POINTS DE LA DEMI-AILE	71
FIGURE 3. 21: INJECTION DES COORDONNEES POUR LA MODELISATION GEOMETRIQUE	72
FIGURE 3. 22: CONSTRUCTION DES LIGNES ENTRE LES POINTS POUR MODELISATION	72
FIGURE 3. 23: VISUALISATION DE LA GEOMETRIE DE LA DEMI-AILE	73
FIGURE 3. 24: IMPORTATION DES FICHIERS DES FRFs.....	73
FIGURE 3. 25: CONFIGURATION DES PARAMETRES DE REPONSE ET D'EXCITATION.....	74
FIGURE 3. 26: ASSIGNEMENT DES FRFs AUX POINTS DE DISCRETISATION	74
FIGURE 3. 27: DECOMPOSITION ET LISSAGE DE LA COURBE FRF.....	75
FIGURE 3. 28: LA COURBE FRF DES 28 POINTS APRES LISSAGE	75
FIGURE 3. 29: MODE 1 (12.50Hz).....	76
FIGURE 3. 30: MODE 2 (30 Hz).....	76
FIGURE 3. 31: MODE 3 (90Hz).....	76
FIGURE 3. 32: GEOMETRIE DE LA DEMI AILE.....	79
FIGURE 3. 33: DEFINITION PROPRIETES FIBRE DE VERRE	80
FIGURE 3. 34: CREATION DES SECTIONS.....	80
FIGURE 3. 35: CREATION DE L'ETAPE D'ETUDE FREQUENTIELLE	81
FIGURE 3. 36: DEFINITION DE LA FREQUENCE MAXIMALE	81
FIGURE 3. 37: CHOIX DE LA FACE D'ENCASTREMENT	82
FIGURE 3. 38: MAILLAGE DU MODELE ADOPTE.....	82
FIGURE 3. 39: SOUMETTRE LE CALCUL	83
FIGURE 3. 40: PREMIER MODE DE DEFORMATION.....	84
FIGURE 3. 41: DEUXIEME MODE DE DEFORMATION	84

Listes des Figure

FIGURE 3.42: TROISIEME MODE DE DEFORMATION	85
FIGURE 3.43 : COMPARISON DES RESULTATS NUMERIQUES ET EXPERIMENTAUX.....	86
FIGURE 3.44: POT VIBRANT	87
FIGURE 3.45: APPLICATION DE LA POUDRE LEGERE SUR LA DEMI AILE.....	88
FIGURE 3.46: VALIDATION VISUELLE DES DIFFERENTS MODES.....	89

CHAPITRE I : Bases Et Fondamentaux Des Drones

TABLEAU 1. 1: CLASSIFICATION DES DRONES[2].....	6
---	---

CHAPITRE II : Rétroconception Modélisation Et Fabrication

TABLEAU 2. 1: COMPOSANTS DU MINI DRONE	20
--	----

CHAPITRE III : Analyse Modale

TABLEAU 3. 1: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU MARTEAU	61
--	----

TABLEAU 3. 2: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'ACCELEROMETRE 736T SN 13712.....	61
---	----

TABLEAU 3. 3: PROPRIETES FIBRE DE VERRE RESINE EPOXY TYPE E	79
---	----

TABLEAU 3. 4 : COMPARAISON DES RESULTATS DES FREQUENCES PROPRES.....	85
--	----

Nomenclature

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
f	La fréquence	Hertz ou s^{-1}
T	Le temps	S
N	La vitesse de rotation	Tour/minute
ω	La pulsation	Rad/S
a	L'accélération	m/s^2
V	La vitesse	m/s
x	Le déplacement	m
θ	Angle de phase	Rad
ρ	La densité	Kg/m^3
μ	La masse linéique	Kg/m
E	Module d'élasticité	Pa
m	La masse nodale	Kg
k	La raideur	N/m
φ	Le déphasage	Rad , ° ou S
L	longueur	m
β_n	Valeur propre	-
I	Moment d'inertie de la section	m^4

Introduction générale

Dans un contexte d'évolution technologique rapide, les drones à voilure fixe se démarquent par leurs performances en termes d'endurance, de portée et de rendement aérodynamique. Leur utilisation se généralise dans divers domaines, qu'ils soient civils, industriels ou militaires. La conception de ces drones, notamment l'analyse de leur comportement structural et vibratoire, représente un enjeu majeur pour garantir leur fiabilité et leur efficacité en vol.

Dans le but de renforcer nos compétences dans le domaine de la théorie des structures, nous avons réalisé un stage au Centre de Recherche et de Développement des Forces Aériennes (CRD-FA) à Dar El Beida. Ce stage a constitué une opportunité concrète d'appliquer nos connaissances à une problématique d'ingénierie aéronautique : l'analyse modale du comportement vibratoire d'une demi-aile de drone à voilure fixe. Ce type d'analyse vise à identifier les fréquences propres et les modes de vibration d'une structure, éléments essentiels pour prévenir les effets de résonance et optimiser la conception mécanique.

Ce travail est structuré en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre pose les bases théoriques nécessaires à la compréhension du sujet. Il présente une vue d'ensemble des drones, en mettant l'accent sur ceux à voilure fixe. Il aborde leur classification, leur fonctionnement, leur structure, ainsi que les types de profils d'aile utilisés, qui influencent directement la stabilité, la portance et les performances en vol.

Le deuxième chapitre est consacré à la rétro-ingénierie, la numérisation 3D et la modélisation complète d'un mini-drone à voilure fixe. À partir d'un drone existant, l'ensemble de la structure (fuselage, ailes, empennage et poutre) a été scanné et modélisé sous SolidWorks. Cette phase a permis de reconstituer virtuellement le drone complet à partir de données réelles. Cependant, la fabrication physique n'a concerné que la demi-aile, réalisée en matériaux composites (fibre de carbone, fibre de verre, Kevlar) à l'aide de techniques combinées de moulage au contact et sous vide.

Le troisième chapitre porte sur l'analyse modale de la demi-aile réalisée, selon trois approches : théorique, expérimentale et numérique. L'approche théorique modélise la structure comme une poutre encastrée-libre pour déterminer les fréquences propres. L'approche expérimentale s'appuie sur des tests utilisant un accéléromètre et un marteau d'impact. Enfin, l'analyse numérique, réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS, permet de simuler le comportement vibratoire de la structure et de valider les résultats obtenus.

Ce projet met en évidence la complémentarité entre modélisation géométrique, expérimentation physique et simulation numérique. Il constitue une démarche complète de rétroconception et d'analyse dynamique appliquée à une structure aéronautique légère, en offrant une base solide pour des travaux futurs en conception optimisée de drones.

Problématique

Problématique

Les structures aéronautiques, et en particulier les ailes, sont soumises à des sollicitations dynamiques importantes lors des différentes phases de vol. Ces sollicitations peuvent engendrer des phénomènes vibratoires critiques, influençant directement la stabilité, la durabilité et la sécurité de l'appareil. La compréhension et la maîtrise du comportement modal de ces structures sont donc essentielles pour prévenir les risques de résonance, d'instabilités aéroélastiques telles que le flottement, ou de défaillances par fatigue.

Dans cette optique, l'analyse modale permet de déterminer les caractéristiques dynamiques intrinsèques d'une structure (fréquences propres, formes modales, amortissement) et constitue un outil fondamental pour la conception, la validation et la maintenance prédictive en aéronautique.

La complexité s'accroît lorsque l'on considère des structures composites, de plus en plus utilisées dans l'industrie aéronautique en raison de leur rapport masse/rigidité avantageux. Les propriétés mécaniques anisotropes et la dépendance des performances aux procédés de fabrication rendent la modélisation théorique de telles structures particulièrement délicates.

Par ailleurs, dans le cas d'un démonstrateur ou d'une pièce existante ne disposant pas de documentation technique exhaustive, il est nécessaire de recourir à une démarche de rétro-ingénierie pour reconstruire la géométrie, estimer les propriétés des matériaux, et générer un modèle de calcul pertinent.

Le présent travail s'inscrit dans ce contexte et porte sur l'analyse modale d'une demi-aile en matériau composite, considérée comme une poutre encastrée-libre, en combinant rétro-ingénierie, modélisation théorique, et validation expérimentale par essais vibratoires.

Dès lors, la problématique peut être formulée comme suit :

Comment reconstruire, modéliser et valider expérimentalement le comportement vibratoire d'une demi-aile en matériau composite, en s'appuyant sur une démarche de rétro-ingénierie, afin de caractériser précisément ses propriétés modales et d'anticiper les risques vibratoires ?

Présentation de lieu de stage

Présentation de lieu de stage

- **Présentation du CRD-FA**

Le Centre de Recherche et Développement des Forces Aériennes (CRD-FA) est un établissement scientifique et technique situé à Dar El Beida. Relevant des Forces Aériennes, il est spécialisé dans les activités de recherche appliquée, d'essais et d'évaluation dans le domaine de la mécanique aéronautique. Ce centre joue un rôle clé dans le soutien technique aux aéronefs en service et dans l'introduction de nouvelles technologies adaptées aux besoins opérationnels.

- **Missions du CRD-FA**

Le CRD-FA a pour principales missions de :

- Réaliser des études et travaux de développement dans le domaine de la mécanique appliquée à l'aéronautique ;
- Assurer la maîtrise d'œuvre des projets techniques qui lui sont confiés ;
- Contribuer à la maîtrise, l'intégration et l'exploitation des technologies relatives aux aéronefs en service au sein des Forces Aériennes ;
- Participer à la conduite d'études de faisabilité et à l'analyse technique des projets à caractère stratégique pour le commandement des Forces Aériennes.

CHAPITRE I : Bases Et Fondamentaux Des Drones

I. Introduction

Ce chapitre vise à poser les fondations nécessaires pour bien appréhender le monde des drones, et plus particulièrement celui des drones à voilure fixe. Nous commencerons par définir clairement ce qu'est un drone, avant de le situer parmi les différentes catégories existantes. Une comparaison entre les drones multi-rotors et ceux à voilure fixe nous permettra de mieux comprendre leurs spécificités et leurs domaines d'application. Ensuite, nous détaillerons la structure principale d'un drone à voilure fixe, en insistant sur les éléments clés qui garantissent sa stabilité et ses performances. Enfin, nous aborderons les notions des profils d'aile, indispensables pour comprendre l'aérodynamisme de ces appareils, ainsi que les familles des profils les plus couramment utilisées. Ce cadre théorique servira de base solide à la compréhension et au développement de notre projet.

1.1 Définition de drone

Le terme « drone » provient de l'anglais et signifie « bourdon » ou « bourdonnement », en référence au bruit émis par certains d'entre eux. Plus généralement, un drone désigne un petit aéronef dépourvu de pilote à bord, conçu pour emporter une charge utile afin d'accomplir une mission spécifique.[1]

La définition la plus répandue du drone est connue sous l'acronyme **UAV** (Unmanned Aerial Vehicle), qui désigne un véhicule aérien sans pilote capable d'exécuter une mission de manière autonome, sans présence humaine à bord. Ce type d'appareil peut être piloté à distance via une station au sol ou une radiocommande, avec ou sans relais satellitaire.

Le drone est également qualifié de **UAS** (Unmanned Aerial System) lorsqu'il s'agit d'un système complet comprenant plusieurs éléments : un ou plusieurs vecteurs aériens sans pilote, une ou plusieurs stations de commande, et des liaisons de données permettant l'échange d'informations entre le vecteur et la station au sol. Les UAS peuvent être dotés de divers capteurs couvrant plusieurs longueurs d'onde (visible, infrarouge, radio) et équipés de systèmes d'écoute ou de brouillage.[1]

Les drones sont utilisés dans des missions variées, telles que la surveillance, le renseignement, l'exploration, le transport. Ils sont principalement déployés par les forces armées ou les services de sécurité (police, douanes, etc.), bien que leur utilisation civile se développe également dans des domaines comme l'agriculture, la cartographie ou la logistique.

La taille et la masse des drones varient considérablement, allant de quelques grammes à plusieurs tonnes, en fonction des capacités opérationnelles requises. Grâce au pilotage automatique, ces appareils peuvent effectuer des vols de très longue durée, atteignant plusieurs dizaines d'heures, comparativement à l'autonomie limitée de deux heures typiquement observées chez les avions de chasse. On peut classer les drones en différentes catégories selon leur taille (voilure, longueur), leur forme (furtive ou non), leur type de propulsion, ainsi que leur altitude et leur endurance.

1.2 Classification des drones

Les drones peuvent être classés selon plusieurs critères, tels que la taille, le poids, la portée de la télémétrie, le type d'aile, l'endurance, l'altitude d'opération, etc.

Une classification intéressante a été proposée par l'Européen Association of Unmanned Vehicles Systems (EUROUVS), qui est devenue plus tard l'Unmanned Vehicles Systems International (UVS International). Cette classification repose sur différents paramètres, comme le poids maximal au décollage, l'altitude maximale et le temps de vol (figure I.1), extrait de Bento (2008, p. 55), présente un résumé complet des quatre principales catégories de drones et de leurs acronymes. [2]

Les drones miniatures et micros (Micro-Air Vehicles, ou MAV) sont les plus petits de ces catégories, utilisés principalement pour des applications civiles, scientifiques ou commerciales.

Les drones tactiques, en revanche, sont destinés aux usages militaires. Ils incluent les drones à portée rapprochée (Close Range, CR), à portée courte (Short Range, SR), à portée moyenne (Medium Range, MR), à longue portée (Long Range, LR), d'endurance (Endurance, EN) et de moyenne altitude et longue endurance (MALE).[2]

Enfin, les drones stratégiques, plus lourds et plus grands, sont conçus pour des applications en haute altitude et longue endurance.

TABLEAU 1. 1: Classification des drones[2]

Catégorie	Acronyme	Poids maximum au décollage (kg)	Altitude de vol maximale (km)	Endurance (h)	Exemple
Micro/Mini drones	MAV	010	025	1	Microbat
	Mini	< 30	0.15 - 0.3	< 2	Aladin
Drones tactiques	CR	150	3	2 - 4	R-Max
	SR	200	3	3 - 6	Phantom
	MR	150 - 500	3 - 5	6 - 10	Hunter B
	LR	-	5	6 - 13	Vigilante 502
	EN	500 - 1 500	5 - 8	12 - 24	Aerosonde
	MALE	1 000 - 1 500	5 - 8	24 - 48	Predator-IT
Drones Stratégiques	HALE	2 500 -12 500	15 - 20	24 - 48	Global Hawk
Drones spécialisés	LET	250	3 - 4	3 - 4	Harpy
	DEC	250	0.05 - 5	< 4	Nulka
	STRATO	À déterminer	20 - 30	> 48	Pegasus
	EXO	À déterminer	> 30	À déterminer	MarsFlyer

1.3 Comparaison entre les drones multi-rotors et les drones à voilure fixe

1.3.1 Définition et principe de fonctionnement

Les drones peuvent être classés selon leur mode de sustentation en deux grandes familles : les drones multi-rotors et les drones à voilure fixe. Cette distinction repose principalement sur la manière dont l'appareil génère la portance et se déplace dans l'espace.

- Les drones multi-rotors utilisent plusieurs hélices (généralement 4, 6 ou 8) qui tournent pour créer la portance nécessaire au vol et assurer la manœuvrabilité.
- Les drones à voilure fixe, en revanche, génèrent leur portance grâce à des ailes fixes, comme un avion. Ils nécessitent un déplacement vers l'avant pour maintenir le vol.

Chaque type de drone présente des avantages et des inconvénients selon les missions envisagées.

1.3.2 Drones multi-rotors

Avantages

- Facilité de pilotage : Capables de décollage et d'atterrissage verticaux (Vertical Take-Off and Landing, VTOL), ils sont simples à manipuler même pour des débutants.
- Grande maniabilité : Ils peuvent effectuer du vol stationnaire et se déplacer dans toutes les directions avec précision.
- Adaptabilité aux espaces restreints : Idéals pour des opérations en milieux urbains ou confinés.
- Coût abordable et maintenance réduite : Accessibles et faciles à entretenir, ce qui les rend populaires dans les usages civils (photographie, inspection, loisirs).

Inconvénients

- Autonomie limitée : Leur consommation énergétique élevée réduit leur temps de vol (entre 20 et 60 minutes selon les modèles).
- Portée et vitesse restreinte : Moins adaptés aux longues distances et aux missions rapides (vitesse moyenne entre 50 et 100 km/h).
- Sensibilité aux conditions climatiques : Ils sont plus vulnérables au vent, à la pluie ou aux variations de température.

1.3.3 Drones à voilure fixe

Avantages

- Autonomie élevée : Capables de voler pendant plusieurs heures, ils conviennent parfaitement aux missions de longue durée.
- Grande portée : Ils peuvent couvrir de vastes zones sur des centaines de kilomètres.
- Vitesse de croisière importante : Plus rapides que les multi-rotors (de 100 à 300 km/h).
- Efficacité énergétique : Leur aérodynamisme leur permet de consommer moins d'énergie, surtout sur les longues distances.

Inconvénients :

- Besoin d'une piste ou d'un dispositif de lancement : Contrairement aux multi-rotors, ils ne peuvent pas décoller ou atterrir à la verticale sans équipement spécifique.
- Moins maniables : Incapables de faire du vol stationnaire ou des déplacements latéraux.
- Pilotage plus technique : Nécessitent une formation plus poussée pour être correctement pilotés.
- Coût plus élevé : Leur fabrication, entretien et réparation sont plus onéreux.

1.4 La structure principale d'un drone à voilure fixe

La structure principale d'un drone à voilure fixe est l'ensemble des éléments qui forment la base du drone et assurent sa stabilité, sa forme et son fonctionnement en vol. Elle comprend généralement :

1.4.1 Le fuselage

C'est la partie centrale du drone. Il contient :

- **Les composants électroniques (contrôleur de vol, GPS, capteurs),**
- **La batterie ou le système d'alimentation,**
- **Et parfois la charge utile (caméras, capteurs, etc.).**

C'est aussi l'élément qui relie toutes les autres parties du drone.

1.4.2 Les ailes

Les ailes sont fixes et génèrent la portance nécessaire pour que le drone puisse voler. Leur forme influence la stabilité, la vitesse et l'autonomie. Elles peuvent être placées au-dessus, au milieu ou en bas du fuselage selon le type de configuration.

1.4.3 L'empennage

L'empennage est situé à l'arrière du drone et sert à maintenir la stabilité en vol :

- **L'empennage horizontal (stabilisateur) contrôle le mouvement de montée et de descente (tangage).**
- **L'empennage vertical (dérive) contrôle la direction gauche-droite (lacet).**

Dans certaines conceptions, ces deux éléments sont remplacés par un empennage en V. Celui-ci est constitué de deux surfaces inclinées en forme de V, qui assurent à la fois la stabilité en tangage et en lacet. Cette configuration permet de :

- **Réduire la masse et la traînée aérodynamique.**
- **Simplifier la structure.**

Mais elle demande un système de commande plus sophistiqué, car les mouvements doivent être coordonnés de façon précise.

1.5 Profil d'aile

1.5.1 Définition

Le profil d'aile correspond à la section transversale d'une aile obtenue en la coupant selon un plan parallèle au plan de symétrie de l'avion.

Grâce aux avancées en aérodynamique, les ingénieurs conçoivent des profils optimisés pour maximiser la portance tout en réduisant la traînée. Il n'existe pas de profil universellement parfait, mais plutôt des profils adaptés en fonction des besoins spécifiques : poids, vitesse de vol, et conditions de vol.[3]

1.5.2 Caractéristiques

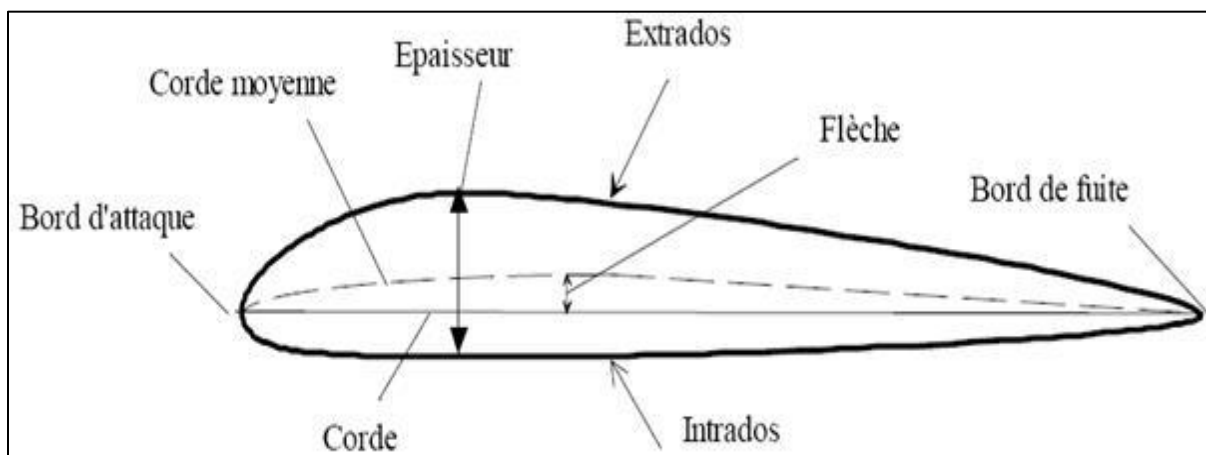


FIGURE 1. 1: Caractéristiques géométriques d'un profil d'aile [6]

- Bord d'attaque : Partie avant de l'aile qui entre en premier en contact avec l'air.
- Bord de fuite : Partie arrière de l'aile où l'air se rejoint après avoir contourné l'aile.

- Extrados : Surface supérieure de l'aile, où l'air se déplace plus rapidement, créant une pression plus faible (principe de Bernoulli).
- Intrados : Surface inférieure de l'aile, où l'air se déplace plus lentement, créant une pression plus élevée qui génère la portance.
- Corde : Ligne droite reliant le bord d'attaque au bord de fuite. Elle varie selon l'emplacement sur l'aile, mais une corde de référence est définie par le constructeur pour les calculs aérodynamiques.
- Épaisseur d'aile : Distance maximale entre l'extrados et l'intrados.
- Épaisseur relative : Rapport entre l'épaisseur et la longueur de la corde.
- Ligne moyenne : Ligne courbée reliant le bord d'attaque au bord de fuite, toujours à égale distance entre l'extrados et l'intrados.
- Flèche : Distance maximale entre la ligne moyenne et la corde, définissant la courbure du profil.

1.6 Les familles de profils utilisées pour les drones à voilure fixe

Les drones à voilure fixe utilisent des profils d'aile adaptés à leurs missions, qu'il s'agisse de longue endurance, vitesse élevée ou maniabilité. Voici les profils les plus courants pour ces aéronefs :

1.6.1 Profils convexes

Caractéristiques

- Génèrent une forte portance même à basse vitesse.
- Permettent une grande autonomie avec une consommation d'énergie réduite.

Utilisation : Drones de surveillance longue durée et drones d'observation (ex : MQ-9 Reaper).[4]

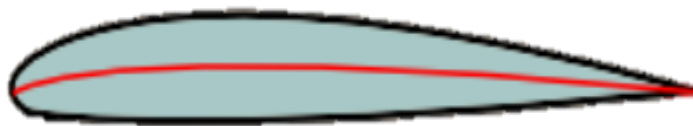


FIGURE 1. 2: Profils convexes [5]

1.6.2 Profils biconvexes dissymétriques

Caractéristiques

- Fournissent une portance suffisante même sans incidence positive.
- Offrent une bonne stabilité.

Utilisation : Drones de loisir et de reconnaissance nécessitant une grande facilité de pilotage.[4]

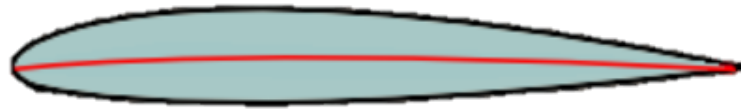


FIGURE 1. 3: Profils biconvexes dissymétriques [5]

1.6.3 Profils symétriques

Caractéristiques

- Ne génèrent aucune portance au repos, mais offrent une grande maniabilité.
- Permettent des figures acrobatiques et une bonne réactivité.

Utilisation : Drones de voltige et drones militaires à grande vitesse. [4]



FIGURE 1. 4: Profils symétriques [5]

1.6.4 Profils supercritiques

Caractéristiques

- Réduisent la traînée d'onde, ce qui est utile pour les drones rapides.
- Améliorent l'efficacité aérodynamique à haute vitesse.

Utilisation : Drones militaires et expérimentaux volant à des vitesses transsoniques.[4]

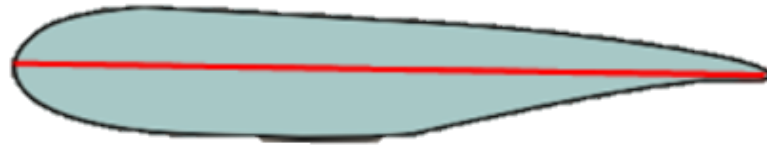


FIGURE 1. 5: Profils supercritiques [5]

1.6.5 Profils à double cambrure (autostable)

Caractéristiques

- Offrent une grande stabilité naturelle, réduisant le besoin de corrections de vol.
- Bonne portance, mais génèrent plus de traînée.

Utilisation : Drones nécessitant une grande autonomie et une stabilité parfaite, comme certains drones d'agriculture ou de cartographie.[4]

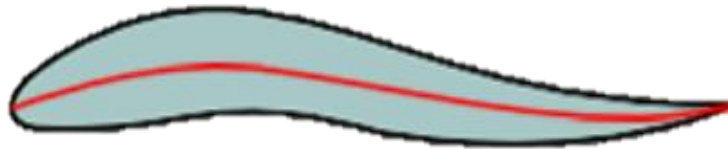


FIGURE 1. 6: Profils à double cambrure (autostable)[5]

1.7 Conclusion

À l'issue de ce chapitre, nous disposons désormais d'une vision claire et structurée des principes fondamentaux qui régissent les drones à voilure fixe. La classification et la comparaison avec les drones multi-rotors ont permis de mettre en lumière les avantages et les contraintes propres à chaque type. La compréhension approfondie de la structure principale ainsi que des profils d'aile offre un socle essentiel pour concevoir des drones performants et adaptés aux missions ciblées. Ces connaissances théoriques nous accompagneront tout au long de notre démarche, depuis la conception jusqu'à la réalisation concrète de notre drone.

CHAPITRE II : Rétroconception Modélisation Et Fabrication

II Introduction

Dans ce chapitre, nous mettons en œuvre une démarche de rétro-ingénierie appliquée à la conception d'un mini drone à voilure fixe et à la fabrication d'un composant clé du drone (l'aile). L'objectif principal était de reproduire cette pièce à partir d'un objet existant, en l'absence de plans initiaux ou de documentation technique. Grâce à l'utilisation d'un scanner 3D haute précision, les données géométriques de l'aile ont été numérisées, puis traitées à l'aide de logiciels spécialisés pour obtenir un modèle exploitable en conception assistée par ordinateur (CAO). Ce modèle a ensuite servi de base à la fabrication d'un prototype physique, en utilisant des matériaux composites performants et des techniques de mise en forme avancées. Ce travail illustre l'apport concret de la rétro-ingénierie dans les projets de reproduction, d'optimisation et d'innovation technologique, en particulier dans le secteur aéronautique.

2.1 Définition

Le reverse engineering (ingénierie inverse ou la rétro-ingénierie) désigne le processus qui consiste à analyser un produit ou un système existant pour comprendre son fonctionnement, sa structure, et ses composants. L'objectif est de reproduire, améliorer, ou de comprendre la technologie sous-jacente sans avoir accès à sa documentation originale.[1]

Cela peut concerner différents types de produits, comme des drones à voilure fixe par exemple. Dans ce cas, le reverse engineering pourrait impliquer le démontage et l'analyse des composants d'un drone (moteurs, système de contrôle, capteurs, etc.) pour comprendre comment il est conçu, comment il vole et comment ses systèmes interagissent. Cela permettrait à un ingénieur de reproduire un modèle similaire, d'en améliorer les performances ou de développer un modèle plus avancé.

Le reverse engineering peut être utilisé à des fins légales comme l'amélioration des produits ou la recherche, mais il soulève aussi des questions éthiques, notamment concernant la violation des droits d'auteur ou des brevets.[1]

2.2 Principes de l'ingénierie inversée

Contrairement à l'ingénierie traditionnelle, qui part d'un cahier des charges pour concevoir un produit, la rétro-ingénierie part du produit fini pour remonter à sa conception. Elle repose sur plusieurs étapes clés. [1]

- **Analyse structurelle** décomposition du produit en ses composants physiques ou logiciels.
- **Analyse fonctionnelle** compréhension des interactions entre les composants, et des principes de fonctionnement
- **Modélisation** reconstruction des schémas de conception, des plans ou des algorithmes.
- **Validation** vérification de la précision des modèles et des hypothèses formulées.

Cette démarche est particulièrement utile lorsque la documentation technique est absente, incomplète ou obsolète, ou lorsqu'il s'agit de comprendre les technologies concurrentes.

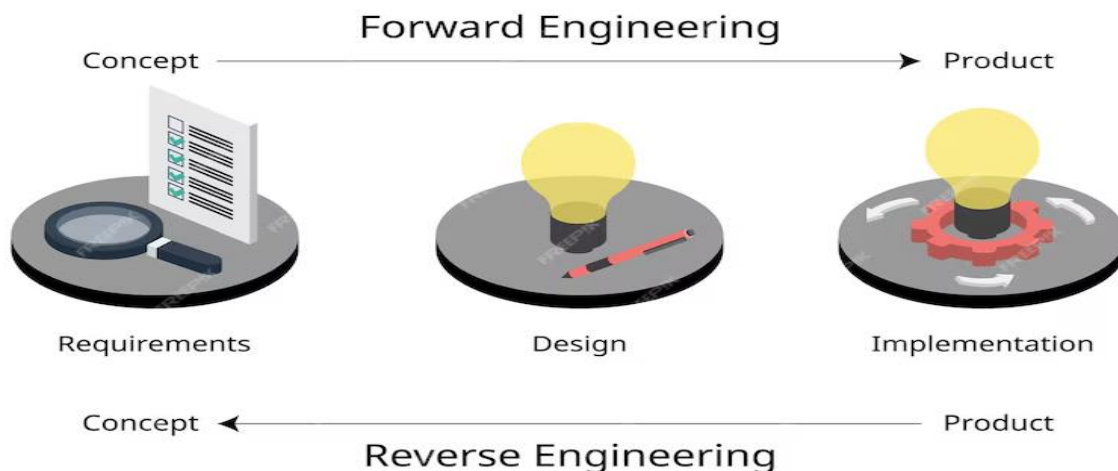


FIGURE 2. 1: L'ingénierie directe et l'ingénierie inversée [12]

2.3 Domaines d'application de l'ingénierie inversée

L'ingénierie inversée trouve des applications dans nombreux secteurs industriels et scientifiques. Voici quelques domaines où elle est couramment utilisée :

- **Industrie manufacturière** : reproduction ou amélioration des pièces mécaniques, des outils ou des équipements ...
- **Génie logiciel** : analyser les codes source d'un programme afin de comprendre son architecture, ses fonctionnalités ou vulnérabilités.
- **Aérospatial et automobile** : étude des composants complexes, tels que des turbines ou des moteurs, afin d'en améliorer les performances ou d'en réduire les coûts de production.
- **Médical et biomécanique** : conception des prothèses ou des implants sur mesure à partir de scans 3D du corps humain.
- **Archéologie et patrimoine** : numérisation et reproduction des artefacts historiques ou des monuments, permettant ainsi de préserver le patrimoine culturel tout en facilitant son étude.

2.4 Méthodologie de l'ingénierie inversée

La mise en œuvre de l'ingénierie inversée repose sur une méthodologie rigoureuse, qui peut être adaptée en fonction du domaine d'application. Les étapes principales sont les suivantes :

2.4.1 Acquisition des données

La première étape consiste à collecter des données sur le produit ou le système à analyser, et cela peut inclure :

- Des mesures physiques en utilisant de scanners 3D, de machines à mesurer tridimensionnelles.
- Des données numériques (analyse des fichiers binaires, ...)
- Des observations fonctionnelles (tests de performances, ...)

2.4.2 Analyse et décomposition

Une fois les données acquises, l'objet est décomposé en ses composants élémentaires.

Cette étape implique:

- L'identification des matériaux et des technologies utilisés.

- La compréhension des interactions entre les composants.
- La cartographie des flux d'information ou d'énergie (système logiciel ou électromagnétique)

2.4.3 Modélisation

Sur la base des données analysées, un modèle numérique ou physique est créé pour représenter l'objet. Ce modèle peut inclure :

- Des plans techniques en 2D ou en 3D.
- Des diagrammes de flux ou des algorithmes.
- Des simulations numériques pour valider les hypothèses.

2.4.4 Validation et amélioration

Le modèle est ensuite validé par comparaison avec l'objet original.

Des tests supplémentaires peuvent être réalisés pour identifier des points d'amélioration, tels que l'optimisation des performances, la réduction des coûts ou l'adaptation à de nouveaux usages.

2.5 Avantages de l'ingénierie inversée

L'ingénierie inversée présente plusieurs avantages dans divers domaines, voici quelques-uns de ses principaux avantages :

- Amélioration des produits existants.
- Réparation et maintenance.
- Réduction des coûts.
- Clonage et reproduction des produits.
- Analyse des concurrents.
- Innovation et développement de nouvelles technologies.
- Droits des propriétés intellectuelles et brevets.
- Compatibilité et intégration.
- Etudes et sécurité.

2.6 Enjeux et limites de l'ingénierie inversée

L'ingénierie inversée présente de nombreux avantages, mais elle soulève également des défis et des questions éthiques :

- Enjeux juridiques et éthiques
- Enjeux techniques
- Enjeux économiques

2.7 Apport du scan 3D à la rétro-ingénierie

Le scan 3D laser est une technologie innovante qui utilise des faisceaux laser pour capturer avec une grande précision la forme tridimensionnelle et les données spatiales d'objets. Cette méthode, à la fois non invasive et non destructive, est particulièrement avantageuse pour traiter des géométries complexes. Elle permet de générer des modèles 3D extrêmement précis à partir d'objets réels, tout en préservant et en améliorant les conceptions, produits ou artefacts existants.

Grâce à sa rapidité et à sa précision, le scan 3D laser est un outil essentiel pour capturer des formes complexes et de vastes surfaces avec une exactitude remarquable. Ainsi, il s'est imposé comme un instrument incontournable pour l'acquisition des données et la modélisation dans de nombreux secteurs industriels.

2.8 Catégories de scanners 3D

Il existe plusieurs catégories de scanners 3D, selon leur usage, typologie, technologie de scan 3D et leur design.

Nous détaillons les différents types de scanners 3D pour clarifier ces différences et expliquer le fonctionnement et les applications de ces scanners 3D.

1. Les scanners 3D de bureau

Les scanners 3D de bureau, qu'ils soient de type fermé ou ouvert, sont généralement équipés d'un plateau rotatif ou d'une table tournante automatisée pour positionner l'objet à numériser. Pendant la numérisation, le plateau effectue une rotation afin de capturer l'objet sous tous les angles, tandis que le capteur du scanner reste fixe. [2]



FIGURE 2. 2: Un scanner 3D de bureau avec table tournante automatique [3]

2. Scanner 3D portable

Les scanners 3D portables sans fil sont conçus pour être tenus à la main, l'utilisateur dirige le scanner 3D vers l'objet ou le sujet à numériser en 3D et effectue une rotation autour de celui-ci pour capturer tous les détails de l'objet. Les scanners 3D portables sont à la fois pratiques et polyvalents, ce qui les rend idéaux dans de nombreuses situations. Ils sont faciles à manipuler et conviennent parfaitement pour effectuer des numérisations 3D dans des endroits difficiles d'accès. [2]

3. Scanners 3D professionnels/industriels et métrologie

Les scanners 3D professionnels et industriels sont spécifiquement développés pour répondre à des exigences élevées de précision et de fiabilité. Ils sont largement utilisés dans des domaines tels que la rétro-ingénierie et l'inspection de pièces. Certains de ces scanners, également appelés Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT), sont spécialement conçus pour des mesures de précision. Ils se basent principalement sur la capture précise des formes, en générant des modèles 3D détaillés sous forme de nuages de points. Ils ne capturent généralement pas les couleurs ni les textures. [2]



FIGURE 2. 3: Variété de scanners 3D portables [3]

- **Scanners 3D corporels (3D body scanners)**

Les scanners 3D corporels peuvent souvent scanner les couleurs et les textures, ce qui est indispensable dans le cadre de la création de figurines imprimées en 3D par exemple.

Les technologies de scan 3D utilisées par les body scanners ou cabines de scan 3D sont soit la photogrammétrie (rapide mais nécessitant beaucoup de capteurs) ou la lumière structurée (haute résolution). [2]



FIGURE 2. 4: Scanner corporel 3D [3]

2.9 Numérisation 3D et ingénierie inversée

Dans le cadre de ce mémoire, l'ingénierie inversée est appliquée à la conception d'un mini drone à voilure fixe mono poutre en V, Type de lancement catapulté/charioté

De 4.5kg de poids, Envergure 3m, Longueur 1.56m.



FIGURE 2. 5: Mini drone à voilure fixe mono poutre en V

2.9.1 Analyse et décomposition

TABLEAU 2. 1: Composants du mini drone

COMPOSANTS	Référence
Moteur	Emax gt 4020/07
Contrôleur de moteur	BLHeli Series 60A
Batterie	Turnigy 3000mAh 6S 30C Li-po XC-60
Hélice	D14 inch / P7 inch
Contrôleur de vol	Pixhawk Cube orange
Servomoteur	MG90S

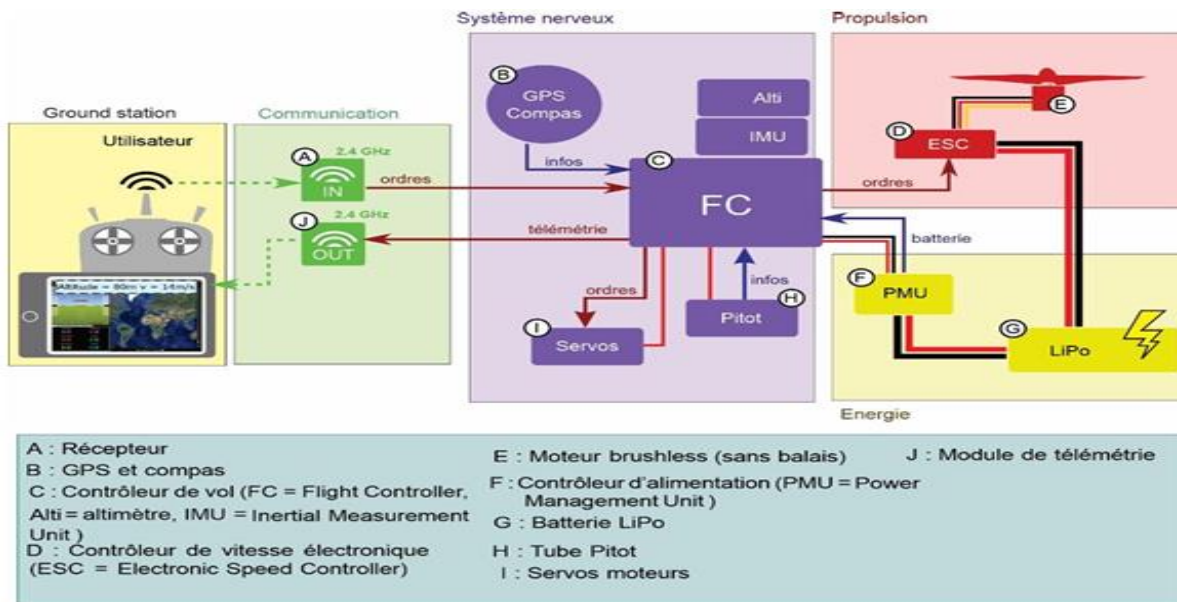


FIGURE 2. 6: Schéma de fonctionnement du mini drone [4]

2.9.2 Scanner portable noir (Handy Scan Black)

Un scanner disponible au laboratoire. Ce système de numérisation 3D est équipé de :

- Un bras ergonomique disposant de plusieurs boutons fonctionnels permettant de contrôler des actions telles que le zoom et le déplacement pendant le processus de scan. Ce bras est également doté d'un indicateur LED intégré qui change de couleur en fonction de la distance entre le bras et l'objet scanné. Cette fonctionnalité visuelle offre une aide précieuse à l'utilisateur, signalant clairement si le bras est trop proche ou trop éloigné de l'objet.[3]
- Un ordinateur relié avec le bras, sur lequel sont installés les logiciels "VXscan" et "VXmodel". VXscan est utilisé pour la capture des données de numérisation. Ensuite, ces données brutes sont traitées à l'aide de VXmodel, un logiciel dédié à la reconstruction, l'optimisation et la modélisation 3D des objets scannés.[3]

2.9.3 Processus de scan

Avant de commencer la numérisation, il est essentiel de préparer correctement le scanner 3D et l'environnement de travail. Voici les étapes clés :

1. Préparation de l'objet à scanner

Cela peut impliquer de nettoyer la surface pour assurer des scans clairs et précis. Les mesures de traitement de surface peuvent inclure l'élimination des réflexions.

2. Étalonnage et calibrage du scanner 3D

- L'étalonnage est une étape essentielle pour garantir la précision des mesures. Il consiste à configurer le scanner pour qu'il interprète correctement les distances et les angles.
Le processus d'étalonnage varie selon le modèle de scanner, mais il implique généralement l'utilisation d'une plaque ou d'un objet de référence de dimensions connues.
- Le scanner est calibré en suivant les instructions du fabricant, en ajustant les paramètres logiciels pour correspondre aux mesures de référence.

3. Montage des cibles

- Les cibles sont des marqueurs réfléchissants ou autocollants placés sur l'objet à numériser et dans l'environnement. Elles servent de points de référence pour le scanner, permettant d'aligner les différentes passes de numérisation.
- Pour le drone, les cibles sont placées stratégiquement sur les surfaces planes et les zones critiques (ailes, fuselage, empennages) pour éviter les erreurs d'alignement lors de la reconstruction du modèle 3D.

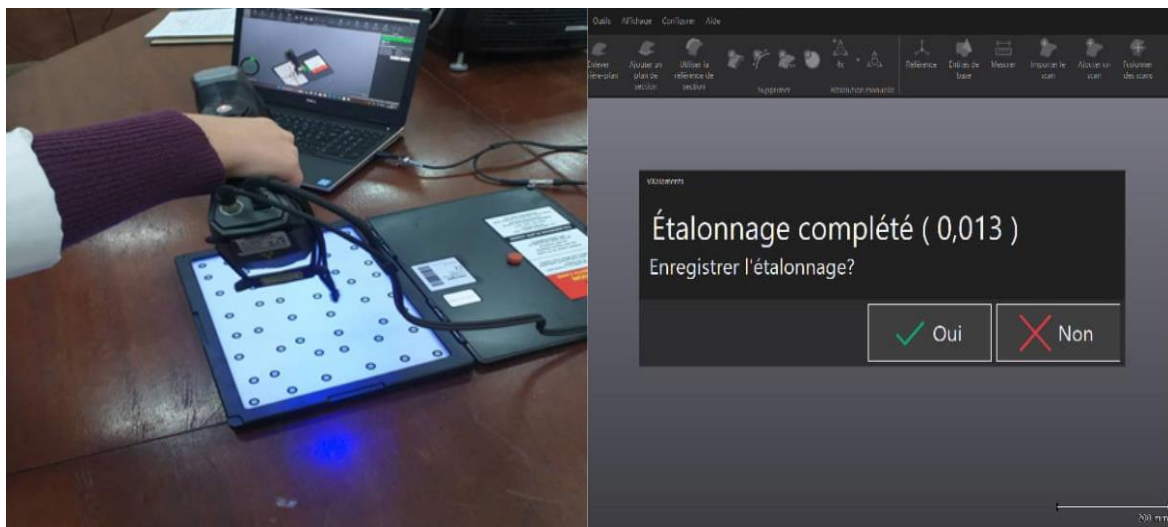


FIGURE 2. 7: Étape d'étalonnage réussie du système de numérisation

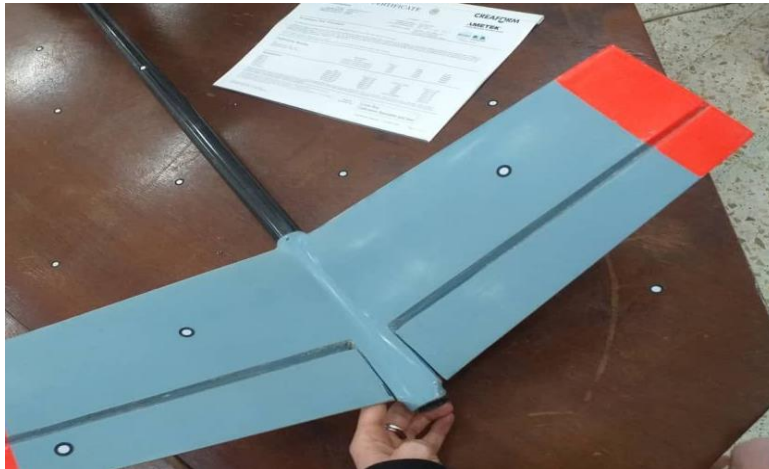


FIGURE 2. 8: Montage des cibles

4. Configuration de l'environnement

- L'environnement de numérisation doit être bien éclairé, sans sources de lumière directe qui pourraient interférer avec le scanner (si c'est le cas on peut utiliser un spray spécial pour régler le problème).
- Le drone est placé sur un support stable, de préférence rotatif, pour faciliter l'accès à toutes les surfaces.
- Les zones environnantes sont nettoyées pour éviter la capture de données parasites.

2.9.4 Opérations de la numérisation 3D

Une fois le scanner étalonné et les cibles en place, le processus de numérisation peut commencer.

1. Acquisition des données

- Le scanner 3D est déplacé autour du drone pour capturer toutes les surfaces. Plusieurs passes sont nécessaires pour couvrir l'intégralité de l'objet.
- Chaque passe capture une partie de la surface sous forme de nuages de points. Le logiciel du scanner guide l'utilisateur pour s'assurer que toutes les zones sont couvertes.
- Les cibles permettent au scanner de relier les différentes passes entre elles, assurant une cohérence spatiale.

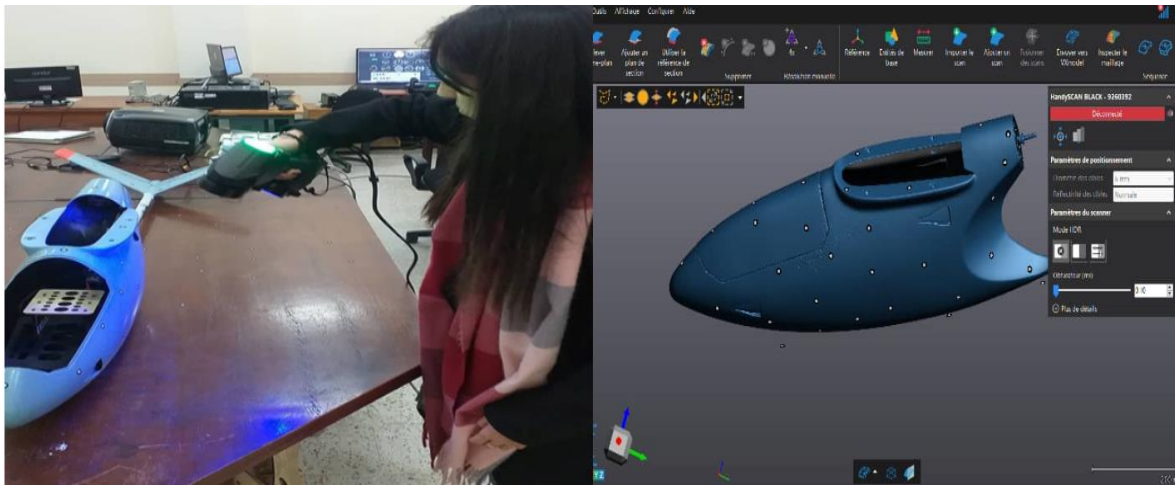


FIGURE 2. 9: Numérisation 3D d'un drone à voilure fixe

2. Contrôle de la qualité des données

- Après chaque passe, les données sont visualisées en temps réel pour vérifier leur qualité. Les zones mal capturées (ombres, reflets, ou zones floues) sont identifiées et rescannées si nécessaire.
- Le logiciel du scanner fournit des indicateurs de précision, tels que la densité des points et l'écart par rapport aux cibles.

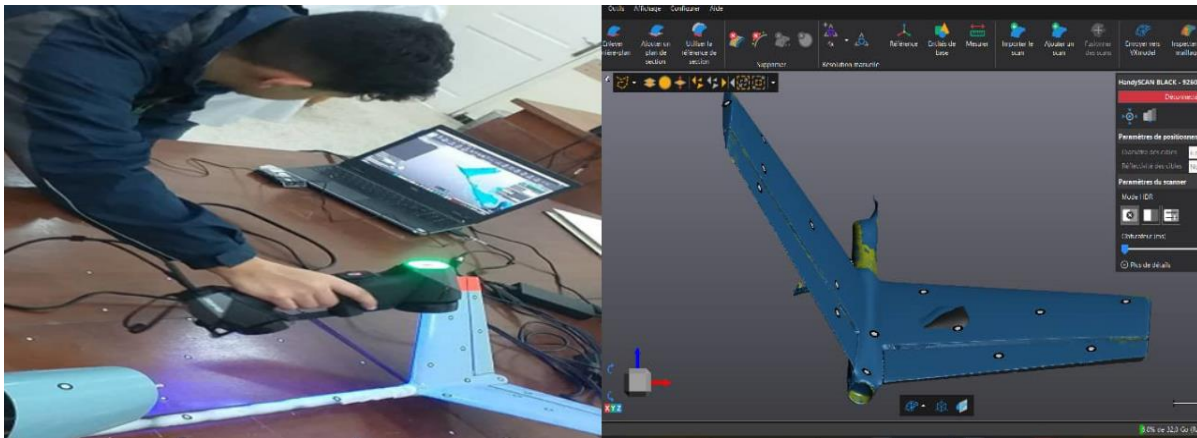


FIGURE 2. 10: Vérification des zones mal capturées

3. Fusion des nuages de points

- Une fois toutes les passes terminées, les nuages de points sont fusionnés en un seul modèle 3D.

- Les cibles servent de points d'ancrage pour aligner les différentes passes.
- Le logiciel du scanner utilise des algorithmes d'optimisation pour corriger les éventuels décalages et garantir une géométrie cohérente.

2.9.5 Post-traitement des données

Après la numérisation, les données brutes doivent être traitées pour obtenir un modèle 3D exploitable. Voici les étapes principales :

1. Nettoyage des nuages de points

- Les artefacts (points parasites, bruit) sont supprimés à l'aide d'outils de filtrage disponibles dans le logiciel du scanner ou dans des logiciels tiers comme MeshLab.
- Les zones manquantes ou mal capturées sont interpolées ou complétées manuellement.

2. Reconstruction de la surface

- Les nuages de points sont convertis en une surface continue (mesh) à l'aide d'algorithmes de reconstruction surfacique.
- La surface est ensuite lissée pour éliminer les irrégularités tout en préservant les détails géométriques.

3. Exportation du modèle 3D

Le modèle final est exporté dans un format standard tel que STL, OBJ ou STEP, en vue d'une utilisation dans des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) ou de simulation.

À l'issue de la numérisation 3D, on obtient généralement un fichier STL, qui décrit la géométrie de l'objet sous forme de maillage triangulaire. Bien que ce format soit adapté à la visualisation et à l'impression 3D, il ne permet pas une modification aisée des formes ni l'application de contraintes mécaniques précises.

Pour une exploitation avancée en CAO, il est donc nécessaire de reconstruire le modèle sous forme paramétrique.

Cette étape vise à convertir le fichier STL en une géométrie optimisée et modifiable dans SolidWorks, afin de l'intégrer efficacement dans un processus de conception ou d'ingénierie.

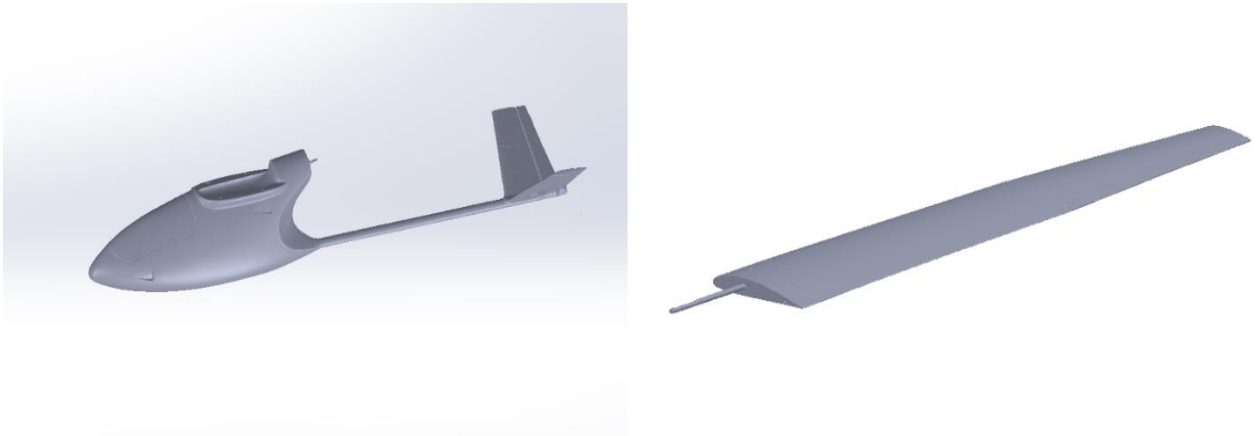


FIGURE 2. 11: Visualisation du modèle STL avant traitement CAO

2.10 Conception des composants du drone

2.10.1 Introduction au logiciel utilisé : SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) développé par Dassault Systèmes. Il permet de modéliser des pièces, de générer des plans techniques, et d'assembler des composants en systèmes complets. Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé la version 2023 de ce logiciel pour concevoir les différentes pièces du drone.

Le choix de SolidWorks repose sur plusieurs critères :

- **Universalité et facilité d'utilisation** : une interface intuitive et des outils performants facilitent la prise en main.
- **Capacité d'adaptation** : le logiciel convient parfaitement à la conception paramétrique ainsi qu'à l'ingénierie inverse.
- **Compatibilité étendue** : il prend en charge de nombreux formats de fichiers tels que STL, STEP, IGES, DXF, etc.
- **Expérience antérieure** : les membres de l'équipe étant déjà familiarisés avec l'environnement SolidWorks, cela a permis de gagner du temps et d'optimiser les étapes de modélisation.

2.10.2 Conception des ailes

1. Importation et préparation du fichier STL

Nous avons commencé par ouvrir SolidWorks, puis importé le fichier STL correspondant à l'aile du drone. Lors de l'importation, nous avons sélectionné l'option permettant de le Convertir directement en corps volumique (solide), afin de pouvoir effectuer les opérations nécessaires par la suite. Une fois les paramètres validés, le modèle a été intégré correctement dans l'espace de travail.

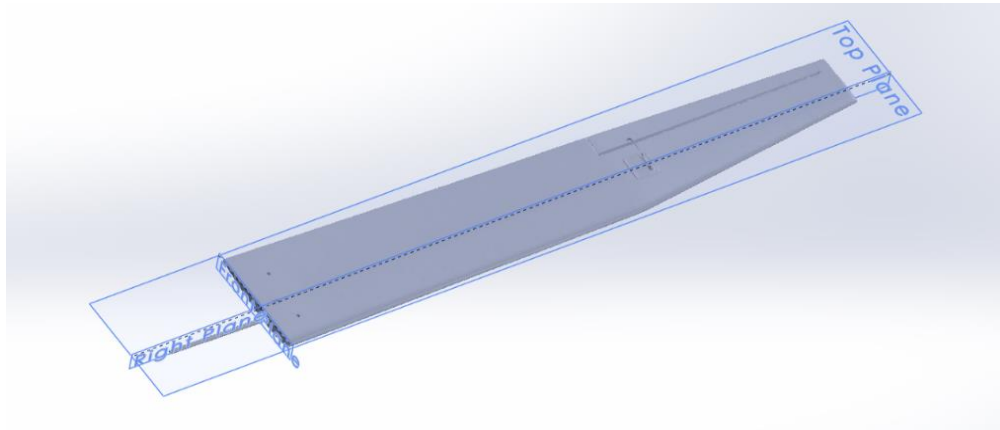
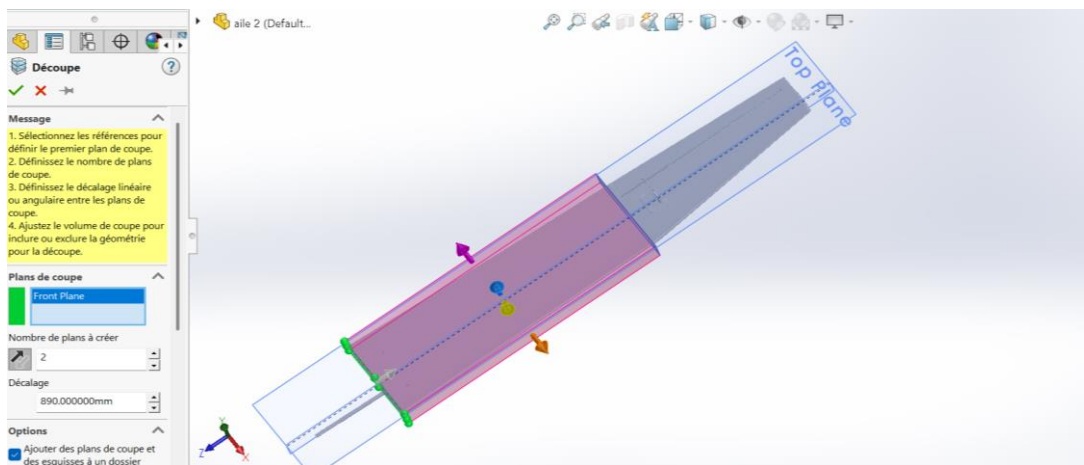


FIGURE 2. 12: Maillage 3D de la demi-aile après la numérisation

2. La découpe du modèle

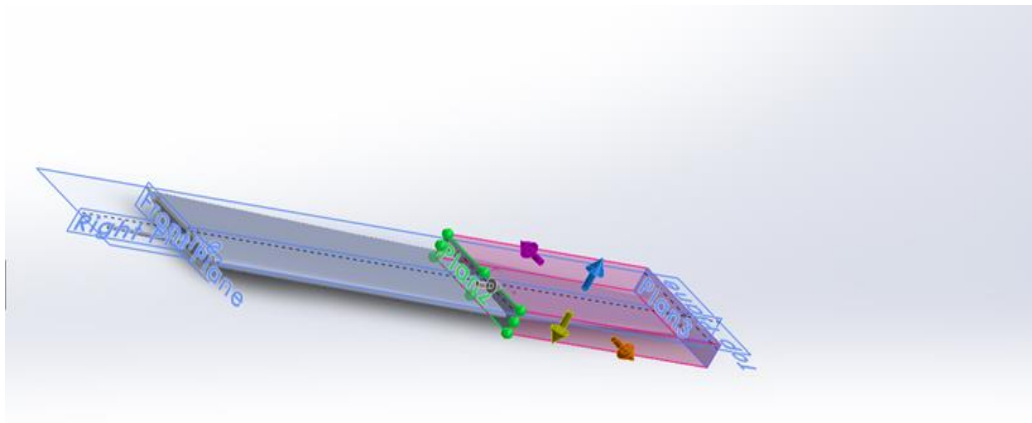
Pour commencer la phase de traitement, nous avons eu recours à l'outil de découpe par plans multiples, qui nous permet de diviser le modèle en plusieurs sections selon des plans définis.

- Le premier plan de coupe a été positionné sur la face frontale de la demi-aile.
- Ensuite, nous avons ajouté un deuxième plan, avec un écartement de 900mm par rapport au premier.
- Après avoir défini ces paramètres, nous avons lancé la découpe et vérifié visuellement que le résultat était conforme à nos attentes.

**FIGURE 2. 13: Découpe par plans multiples**

3. Répétition de la découpe pour d'autres zones

Une deuxième découpe a été réalisée en répétant le même processus que précédemment. Cette fois, le plan de coupe a été positionné avec un écartement de 1500 mm par rapport au premier. Les paramètres ont été soigneusement ajustés pour optimiser la précision de la découpe, en tenant compte de la géométrie de la zone concernée. Cette étape a permis d'obtenir une segmentation plus fine et mieux adaptée aux besoins de la modélisation et des analyses futures.

**FIGURE 2. 14: Découpe par plans multiples**

4. Correction des défauts et ajustement des contours

À cette étape, nous avons procédé à l'identification puis à la correction de certains défauts géométriques présents sur le modèle initial. Ces irrégularités pouvaient nuire à la précision des opérations suivantes. Pour améliorer la qualité des courbes, nous avons utilisé l'outil "Ajuster la spline", qui nous a permis de retravailler les profils en assurant une transition plus fluide et continue entre les différentes sections.

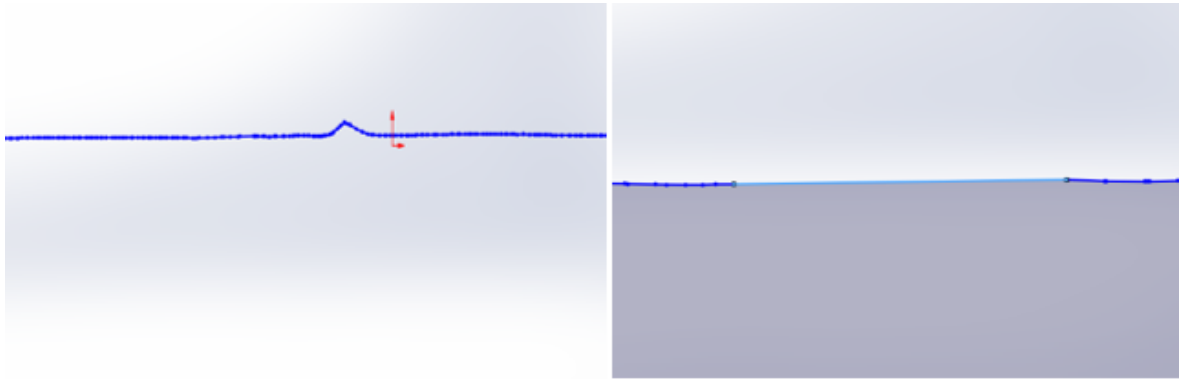


FIGURE 2. 15: Ajustement des contours

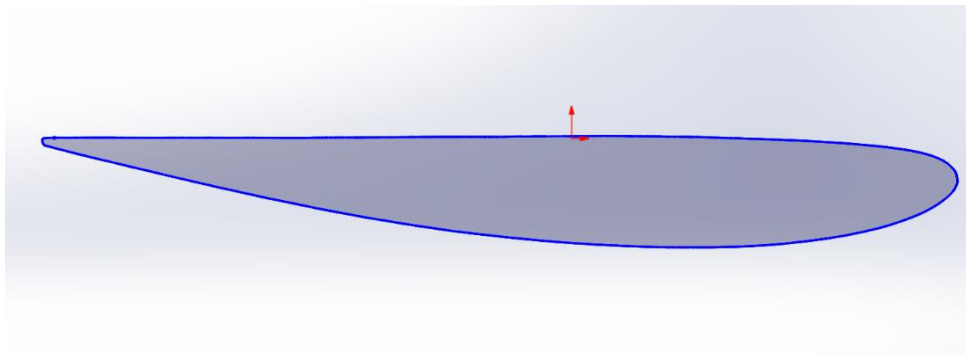


FIGURE 2. 16: Ajuster la spline

5. Application du lissage avec la fonction "Base lissée"

Une fois les découpes et ajustements terminés, nous avons employé la fonction "Base lissée" pour assembler les différentes sections issues de la découpe. Cette opération est essentielle pour générer une surface uniforme, sans discontinuité notable entre les coupes.

Le lissage a permis d'obtenir une forme finale harmonieuse, répondant aux exigences esthétiques et aérodynamiques du modèle.

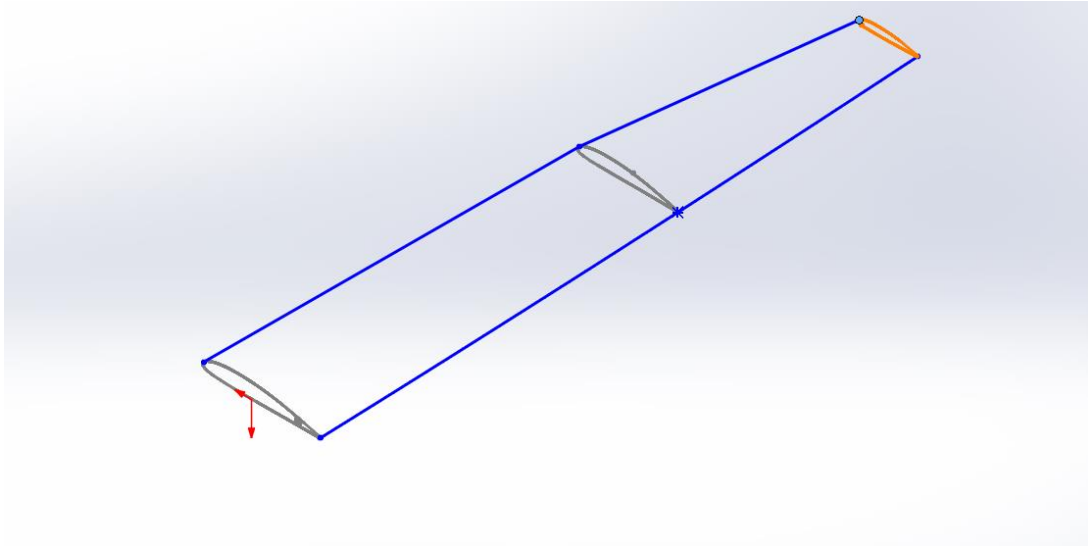


FIGURE 2. 17: Application du lissage

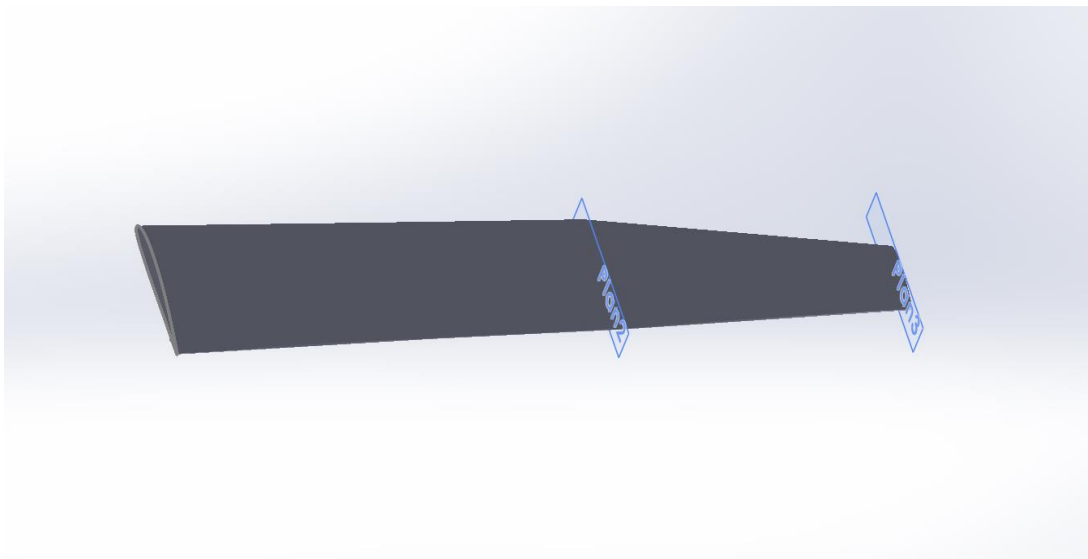


FIGURE 2. 18: Modélisation 3D de la demi-aile du mini drone

2.10.3 Conception du fuselage :

Le fuselage constitue l'élément principal de la structure du mini drone, servant à accueillir les composants électroniques, la propulsion ainsi que les systèmes embarqués.

Sa modélisation a été réalisée à partir d'un fichier STL obtenu par rétro-ingénierie, en appliquant la même méthodologie utilisée pour la conception de l'aile.

Après l'importation du fichier STL en tant que corps volumique sous SolidWorks, une série de découpes multiples a été effectuée à l'aide de plans transversaux répartis sur la longueur du fuselage. Les profils obtenus ont été ajustés à l'aide de l'outil Spline pour corriger les éventuelles irrégularités, puis interpolés avec l'outil Base lissée afin d'obtenir une surface continue et fidèle à la géométrie originale. Cette méthode permet d'assurer une bonne qualité de surface, une transition fluide entre les sections, et de disposer d'un modèle numérique prêt pour l'usinage ou la simulation.

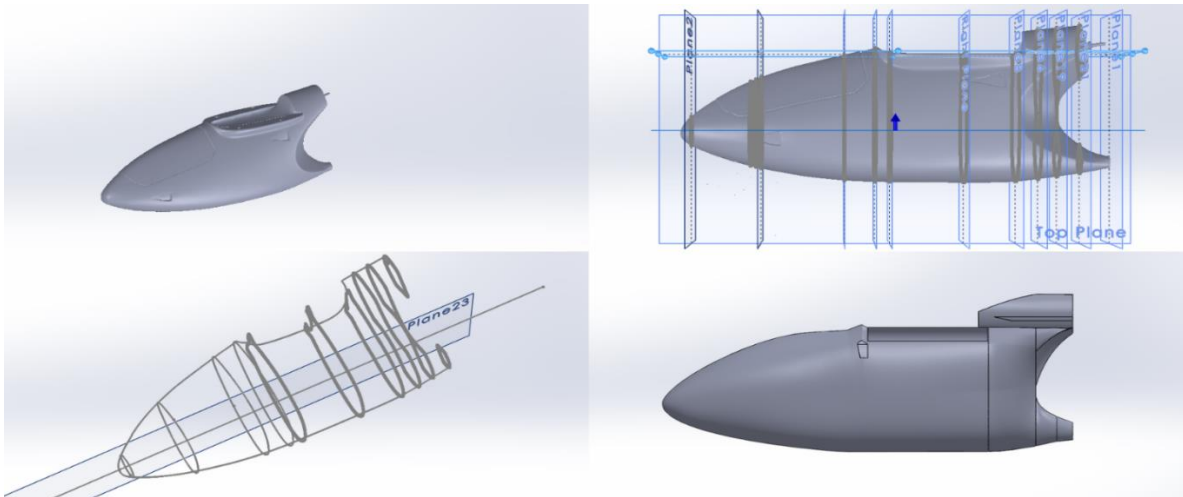


FIGURE 2. 19: Modélisation 3D de fuselage du mini drone

2.11.1 Conception de la poutre

La poutre est une pièce qui relie le fuselage à l'empennage et assure la stabilité du drone. Elle a été conçue de la même manière que l'aile à partir du fichier STL. Après l'importation, des découpes multiples ont été réalisées, les courbes ont été ajustées avec l'outil Spline, puis un lissage a été appliqué pour obtenir une surface lisse et continue.



FIGURE 2. 20: Modélisation 3D de la Poutre du mini drone

2.10.4 Conception de l'empennage

L'empennage, composé de la dérive verticale et du plan horizontal en forme de V, a été modélisé de la même manière que les autres parties du mini drone. À partir du fichier STL importé, des découpes transversales régulières ont été réalisées. Les profils obtenus ont été affinés à l'aide des splines pour corriger les imprécisions liées à la rétro-ingénierie. Enfin, l'outil Base lissée a permis d'interpoler les sections et de créer un modèle 3D prêt pour la fabrication ou la simulation.

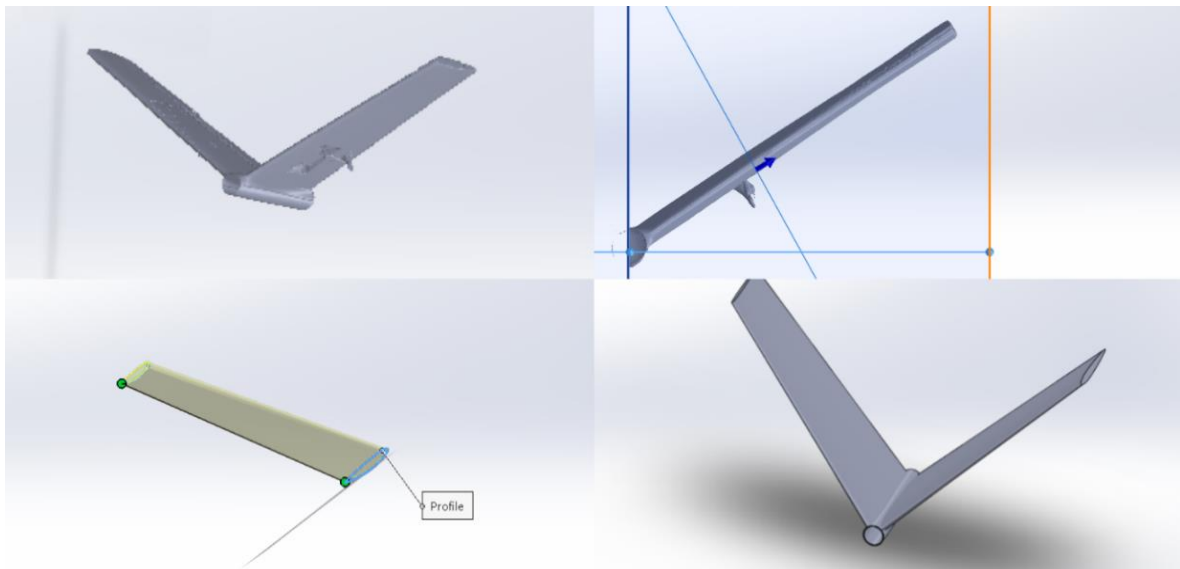


FIGURE 2. 21: Modèle 3D de l'empennage

2.10.5 Assemblage et modèle Final

Après la modélisation précise de chaque composant du drone, l'ensemble a été assemblé virtuellement afin d'obtenir une représentation 3D complète et fidèle du système. Ce modèle final permet de visualiser l'intégration des différentes pièces, de vérifier leur compatibilité et de préparer les étapes ultérieures comme la simulation ou la fabrication. L'assemblage assure une cohérence globale entre l'aérodynamique, la structure et la fonction du drone.

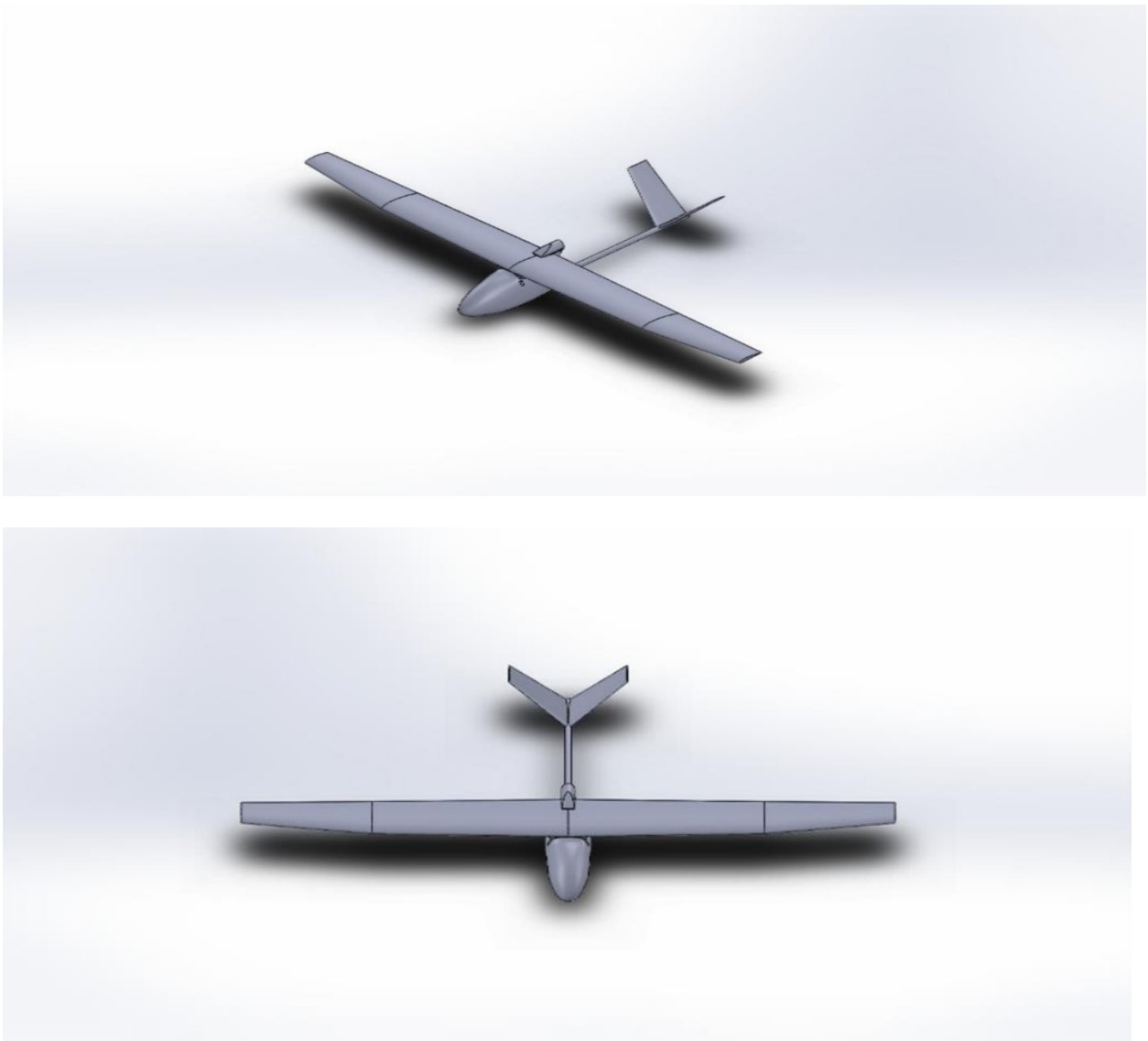


FIGURE 2. 22: Assemblage 3D du mini drone

2.11 Réalisation de la demi-aile du mini drone

Après avoir achevé la phase de conception de la demi aile du drone, intégrant les exigences aérodynamiques, mécaniques et structurelles, l'étape suivante consiste à matérialiser cette conception à travers la fabrication. Pour répondre aux contraintes de légèreté, de rigidité et de performance, le choix s'est naturellement porté sur l'utilisation de matériaux composites. Cette transition de la modélisation numérique à la réalisation physique permet de concrétiser les choix de conception et de valider, par la suite, le comportement réel de la demi aile face aux sollicitations prévues.

2.11.1 Matériaux composites utilisés pour la fabrication de la demi-aile

1. Les renforts utilisés

- **Fibre de carbone**

Très prisée pour ses excellentes propriétés mécaniques, elle est légère, rigide et offre une résistance exceptionnelle à la traction. Elle est souvent utilisée dans les structures où performance et poids réduit sont essentiels. Cependant, son coût reste relativement élevé.[4]

- **Fibre de verre**

Moins chère que la fibre de carbone, elle offre une bonne résistance mécanique et une grande flexibilité. Elle est également résistante à la corrosion et facile à mettre en œuvre, ce qui en fait un choix populaire pour des applications moins exigeantes.[5]



FIGURE 2. 24: Tissu de carbone [8]

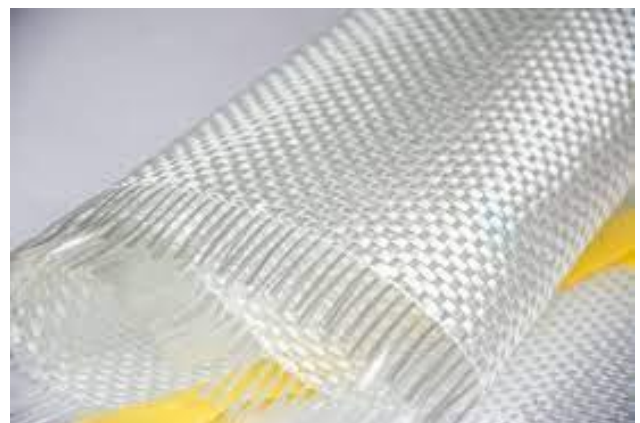


FIGURE 2. 23: Tissu de verre [9]

- **Fibre d'aramide (Kevlar)**

Connu pour sa résistance exceptionnelle aux chocs et à l'abrasion, le Kevlar est souvent utilisé dans des zones soumises à des sollicitations dynamiques importantes. Il est également très léger, mais un peu moins rigide que la fibre de carbone.[6]

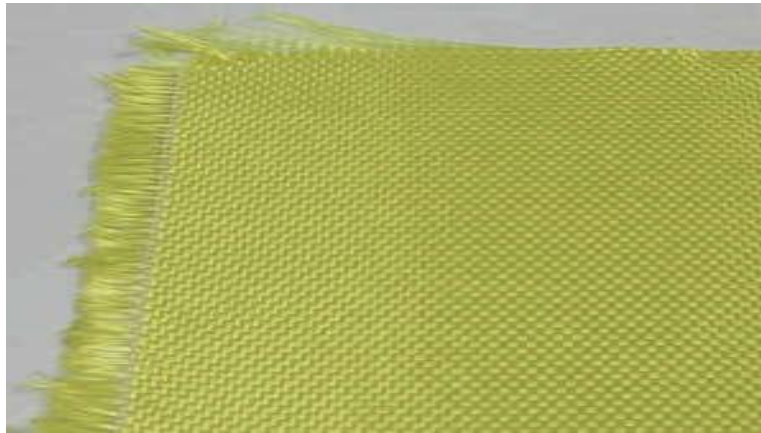


FIGURE 2. 25: Tissu kevlar balistique

2. La matrice utilisée

La résine époxy est une matrice thermodurcissable largement utilisée dans les matériaux composites pour ses excellentes propriétés mécaniques et chimiques. Elle se distingue par sa forte adhérence aux fibres, sa résistance à la corrosion, sa stabilité dimensionnelle et son bon comportement à long terme. En aéronautique, et particulièrement dans la fabrication de drones à voilure fixe, la résine époxy est souvent choisie pour ses performances supérieures, notamment sa capacité à bien transférer les contraintes entre les fibres de renfort et à maintenir la rigidité du matériau composite sous diverses sollicitations.[7]

2.11.2 Le procédé utilisé (Méthode combinée : moulage au contact + moulage sous vide)

1. Moulage au contact

Le moulage au contact consiste à disposer manuellement dans un moule les renforts sous forme de mat ou de tissu, qui sont imprégnés à la main avec une matrice thermodurcissable (résine). Cette méthode permet de réaliser des pièces de formes variées, mais avec une cadence de production relativement faible.[11]

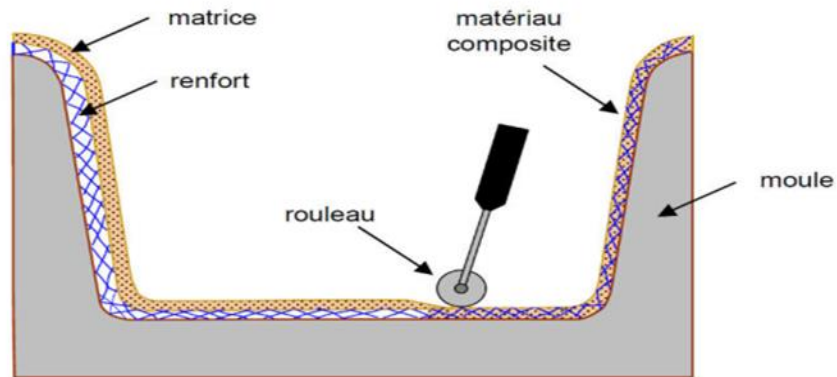


FIGURE 2. 26: Principe du moulage au contact [11]

2. Moulage sous vide

Après application de la résine, un film plastique appelé sac à vide est placé sur la pièce. Une pompe à vide est alors utilisée pour extraire l'air entre le sac et la pièce.

Cette dépression élimine les bulles d'air, améliore l'imprégnation de la résine dans les fibres et assure une meilleure compaction des renforts, ce qui augmente la qualité et la performance du composite.[8]

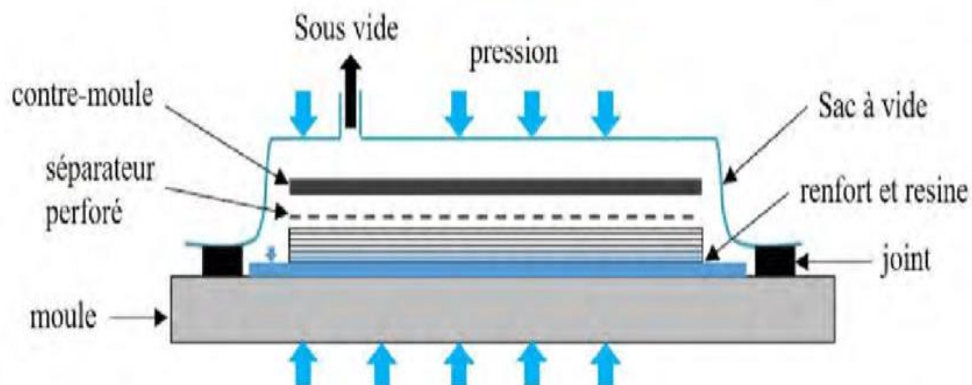


FIGURE 2. 27: Schéma du procédé de moulage sous vide [11]

3. Architecture de la demi-aile (Sandwich)

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion.[7]

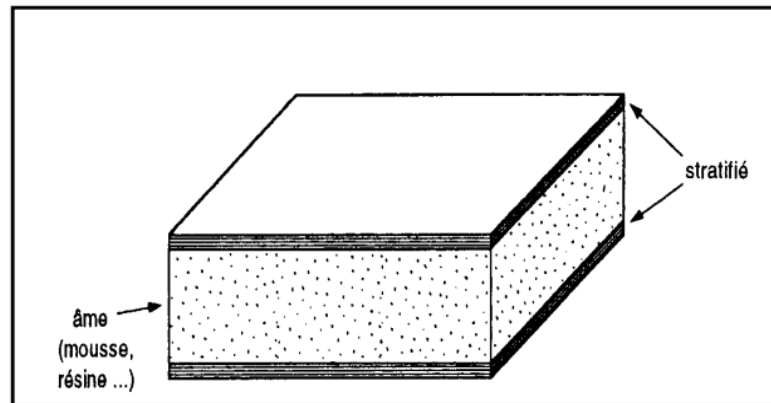


FIGURE 2. 28: Matériaux sandwichs à âmes pleines [7]

2.11.3 Découpe de la demi-aile

1. Processus de découpe

Dans notre processus de fabrication, nous utilisons des profils d'aile que nous avons préalablement modélisés sous SolidWorks. Chaque profil est soigneusement exporté au format DXF, un format vectoriel parfaitement compatible avec les logiciels de découpe CNC.

Nous importons ensuite ces profils DXF dans DevFoam 3D, un logiciel spécialisé dans la création des trajectoires de découpe pour les machines CNC à fil chaud. DevFoam 3D nous permet de simuler le mouvement du fil en temps réel, ce qui nous offre une excellente visibilité sur le déroulement de la découpe et nous permet d'anticiper toute erreur éventuelle. Après validation de la simulation, nous générons automatiquement le G-code nécessaire pour piloter la machine CNC.

Dans notre projet, la demi-aile à fabriquer est trapézoïdale avec une variation progressive de la corde. Pour cela, nous avons préparé trois profils distincts :

- Un profil d'emplature avec une corde de 288 mm.

- Un profil intermédiaire avec une corde de 250 mm.
- Et un profil de saumon avec une corde de 155 mm.

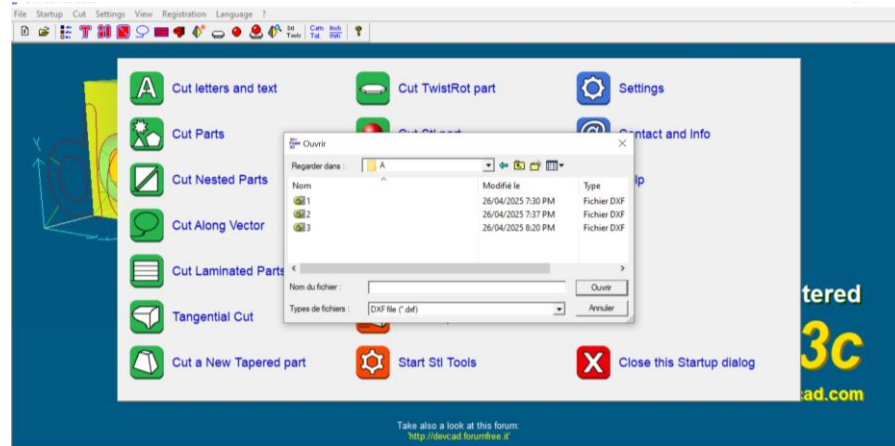


FIGURE 2. 29: Importation des profils en format DXF sur Devfoam

À chaque fois, nous travaillons simultanément sur deux profils dans DevFoam 3D : l'emplanture avec le profil intermédiaire, puis le profil intermédiaire avec le profil de saumon. Cette méthode permet de découper progressivement toute la demi-aile en respectant la variation de la corde.

Lors de l'importation dans DevFoam 3D, nous veillons à aligner précisément les profils en utilisant des points de synchronisation placés au niveau de bord d'attaque et des ouvertures. Cette étape est cruciale pour garantir la fidélité de la forme finale de la demi-aile.

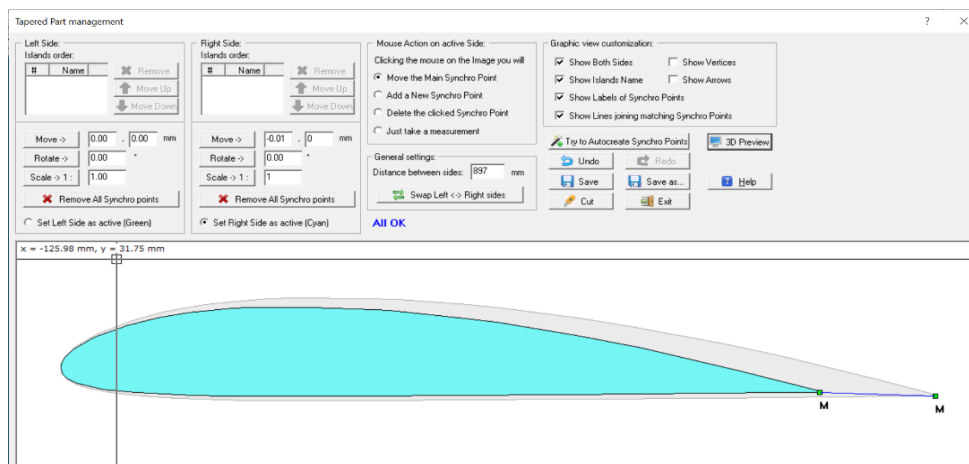


FIGURE 2. 30: L'Alignement des profils

Pour intégrer directement les perforations dans la découpe, nous avons ajouté deux lignes verticales descendantes sur les profils. Ces lignes servent de guides pour le fil chaud, permettant de découper précisément les ouvertures nécessaires sans opérations supplémentaires après la découpe.

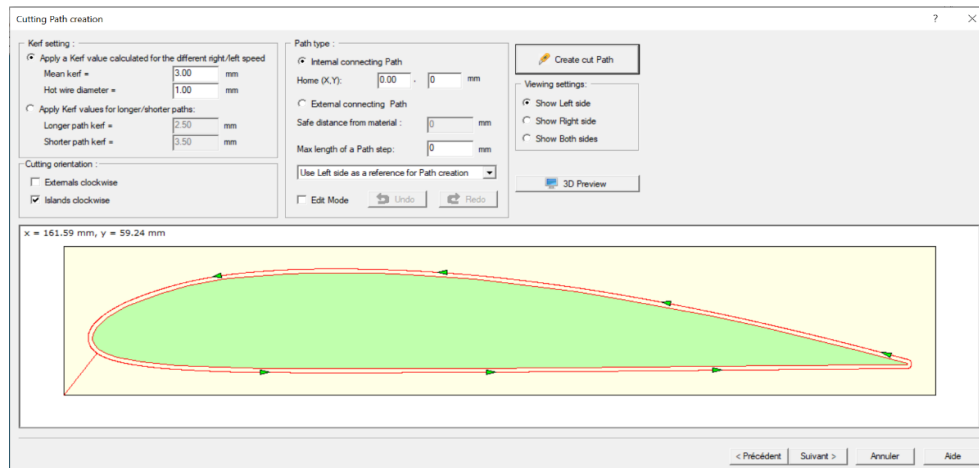


FIGURE 2. 31: Guidage pour la découpe

Grâce à cette méthode, nous assurons une fabrication précise, rapide et conforme aux exigences de notre projet.

Une fois l'alignement terminé et les paramètres de découpe réglés nous procédons à la simulation complète du processus de découpe.

Durant cette simulation :

- Nous observons le déplacement synchronisé des moteurs.
- Nous vérifions que le fil suit correctement le bord d'attaque jusqu'au bord de fuite.
- Nous contrôlons la continuité du mouvement, la tension du fil, et l'absence d'erreurs d'inversion ou de décalage.

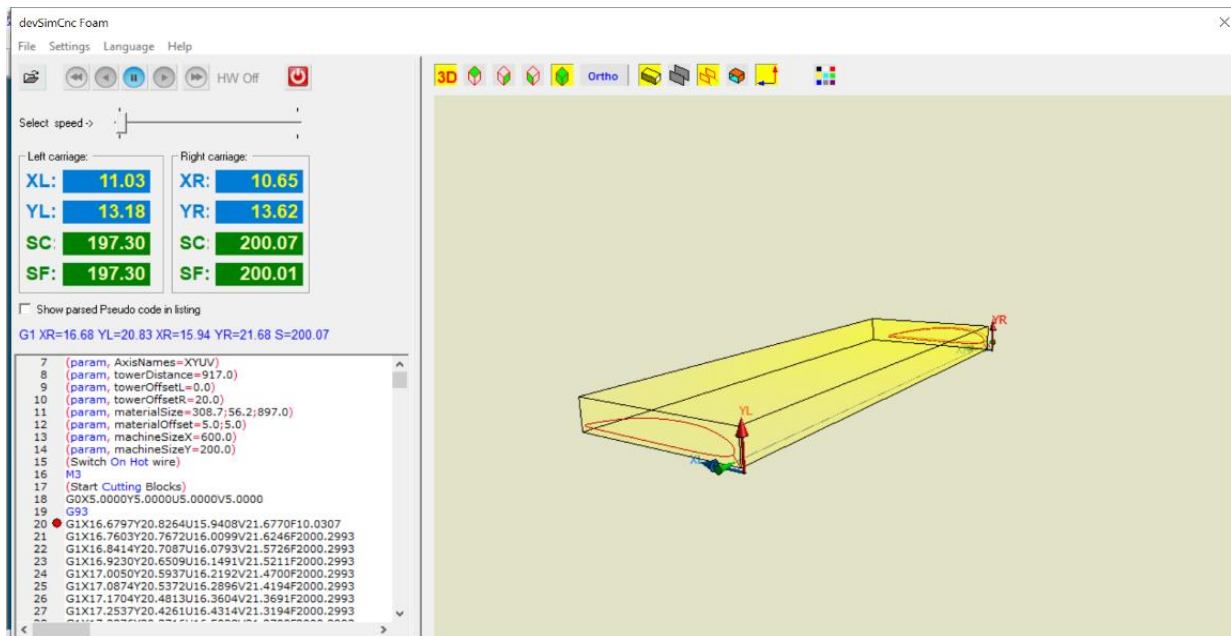


FIGURE 2. 32: Génération du G-code et simulation de découpe

La simulation constitue une étape cruciale pour valider la trajectoire avant la génération définitive du G-code. Ce contrôle rigoureux garantit une découpe conforme aux spécifications sans nécessiter d'ajustements ultérieurs.

Une fois la simulation terminée et validée, nous passons à la génération du G-code. Ce fichier contient toutes les instructions nécessaires pour que la machine CNC effectue la découpe exactement comme prévu.

2. Importation du G-code

L'importation du G-code généré précédemment dans le logiciel MACH3 CNC. Ce dernier joue un rôle crucial, car il permet de transférer les instructions à la carte mère de la machine CNC.

Une fois ces données interprétées par la carte mère, le processus de découpe peut être lancé. Cette étape garantit une exécution précise et efficace de toutes les opérations de fabrication.

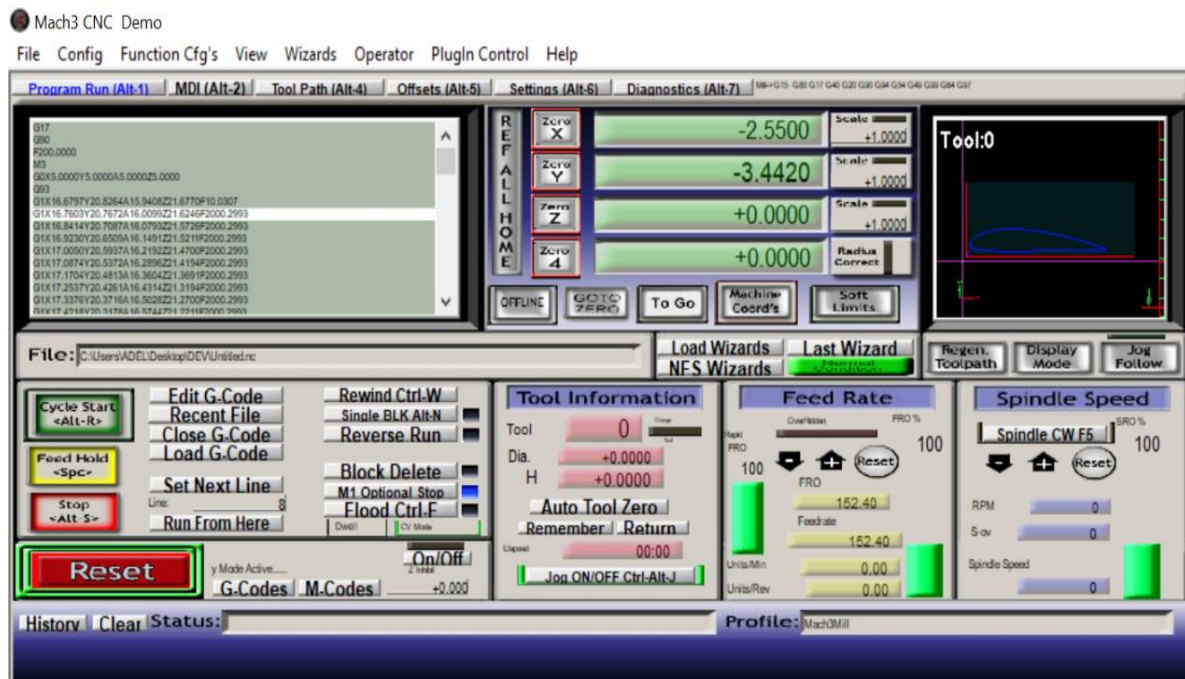


FIGURE 2. 33: Importation du G-CODE pour commencer la découpe

3. La découpe

Pour cette phase, nous devons souvent être deux personnes pour assurer la parfaite perpendicularité du fil chaud par rapport au bloc de mousse. Nous positionnons l'une de chaque côté du bloc afin de surveiller et ajuster la découpe si nécessaire. Une fois cette configuration mise en place et le programme d'usinage vérifié via simulation, nous lançons l'usinage en suivant la séquence de découpe.

Il est important de noter qu'en raison de la chaleur élevée du fil chaud, il faut prendre en compte une perte d'épaisseur d'environ 2 mm autour du fil pendant l'usinage. Cette perte est essentielle pour obtenir la précision des dimensions finales et éviter des ajustements postérieurs.



FIGURE 2. 34: Préparation de la découpe

2.11.4 Fabrication de la demi-aile

1. Conception et fabrication des nervures en bois

Les nervures ont été conçues à partir du profil aérodynamique de la demi-aile, en utilisant un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Cette étape a permis de générer des profils personnalisés adaptés aux exigences structurelles de notre modèle.

Une fois la modélisation achevée, nous avons procédé à la découpe des nervures dans des panneaux de contreplaqué, à l'aide d'une machine à commande numérique (CNC), garantissant ainsi une précision et une répétabilité optimales.

Ces nervures jouent un rôle fondamental dans la structure de la demi-aile. Elles assurent sa rigidité et permettent de répartir les efforts mécaniques subis durant les phases de vol ainsi que lors des essais dynamiques.

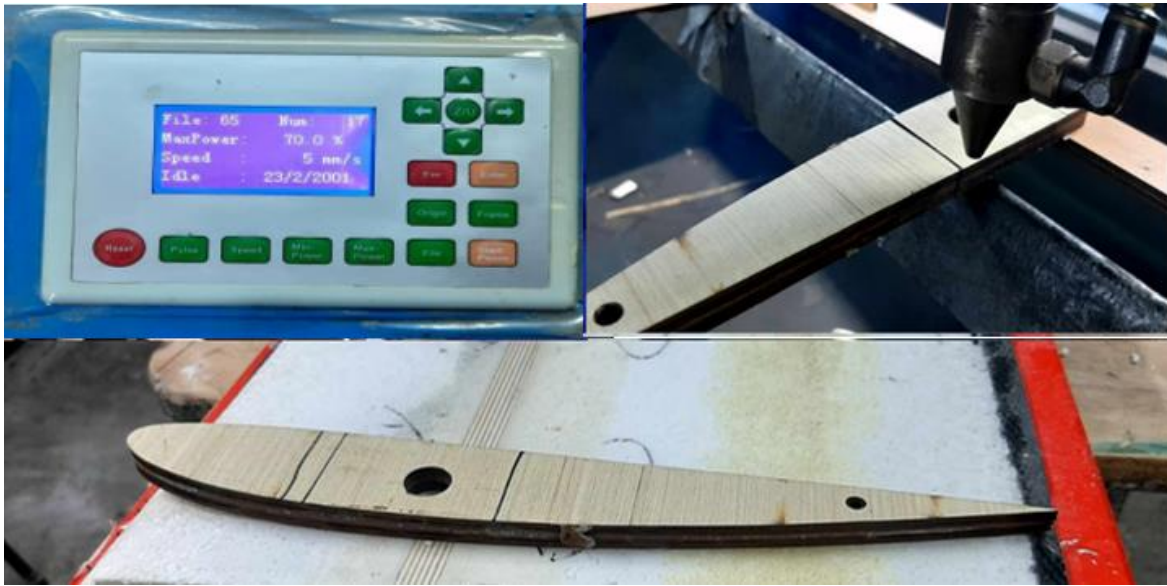


FIGURE 2. 35: La découpe des nervures

2. Fabrication du Longeron

Le longeron constitue l'élément central de la structure interne de la demi-aile, jouant un rôle clé dans la résistance mécanique. Il supporte et transmet les charges aérodynamiques lors du vol, notamment les efforts de flexion et de torsion.

Nous avons suivi les étapes suivantes de fabrication et montage :

- **Rainurage de la mousse pour le longeron**

En utilisant la DREMEL une rainure a été réalisée dans le bloc de mousse constituant la demi aile, à l'emplacement défini par la conception CAO. Cette opération a été effectuée avec précision afin de respecter scrupuleusement les dimensions prévues pour l'intégration du longeron.

Cette rainure permet d'accueillir le longeron de manière parfaitement ajustée, garantissant ainsi une bonne répartition des charges et une liaison mécanique fiable entre la structure interne et la mousse de la demi-aile. Le respect des cotes et de l'alignement est essentiel pour assurer la stabilité structurelle et les performances aérodynamiques du drone.

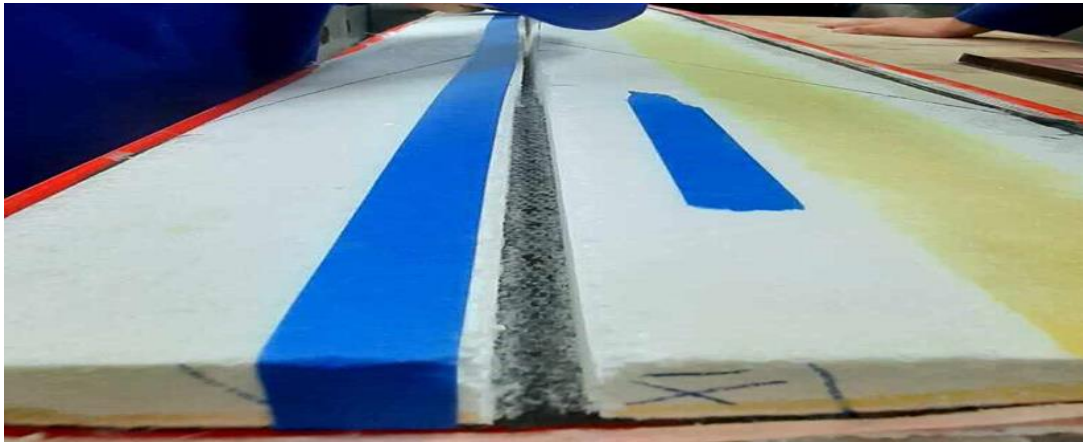


FIGURE 2. 36: Rainurage de la mousse

- **Préparation du longeron**

Le longeron est fabriqué en collant plusieurs plaques de bois dur ensemble, disposées de manière à garantir une résistance optimale et une stabilité structurelle. Chaque plaque est découpée aux dimensions requises, puis soigneusement alignée avant l'application d'une colle spécialisée pour assurer une adhésion solide et durable.

Une fois les plaques assemblées, des traitements de surface peuvent être appliqués pour améliorer la résistance mécanique et préparer le longeron à l'intégration avec d'autres composants.



FIGURE 2. 37: Préparation du longeron

- **Fixation du fourreau sur le longeron**

Pour garantir une fixation optimale du fourreau au longeron, des fils de Kevlar imprégnés de résine époxy ont été enroulés autour des zones de contact entre le fourreau et le longeron.

Cette méthode assure une liaison solide et fiable, renforçant ainsi la structure et optimisant la transmission des forces mécaniques.

L'utilisation du Kevlar, en combinaison avec la résine époxy, renforce la résistance et la durabilité de l'assemblage, tout en réduisant les risques de déformation ou de rupture sous charges dynamiques élevées. Cette technique assure une cohésion parfaite entre le fourreau et le longeron, garantissant ainsi la stabilité et la performance du drone lors des phases de vol.



FIGURE 2. 38: Fixation du fourreau avec le longeron

- **Montage et collage**

Le longeron a été inséré dans la rainure de mousse et fixé à l'aide d'une mousse expansive PU 600. Avant cette étape, des bandes de tissu en fibre de verre imprégnées de résine ont été placées sous le longeron dans les zones critiques. Ce renfort a optimisé la répartition des contraintes mécaniques entre l'insert et la mousse.

Le PU 600 a ensuite été utilisé pour combler les interstices autour de l'insert, garantissant ainsi une pression uniforme et une structure solide. La combinaison de la mousse et du tissu contribue à augmenter la résistance globale du longeron et à réduire les risques de désolidarisation ou de rupture, notamment lors des phases de vol soumises à de fortes charges dynamiques.

Cette opération nécessite des tolérances très strictes, car tout jeu excessif pourrait compromettre l'assemblage final et nuire à l'efficacité de la transmission des charges pendant le vol. Après cette étape, l'ensemble de la surface est soumis à une phase de ponçage et de finition.

Cette opération vise à uniformiser l'interface entre l'insert et la mousse, garantissant ainsi un alignement parfait et une continuité de surface, essentielle à la qualité aérodynamique de la demi aile.

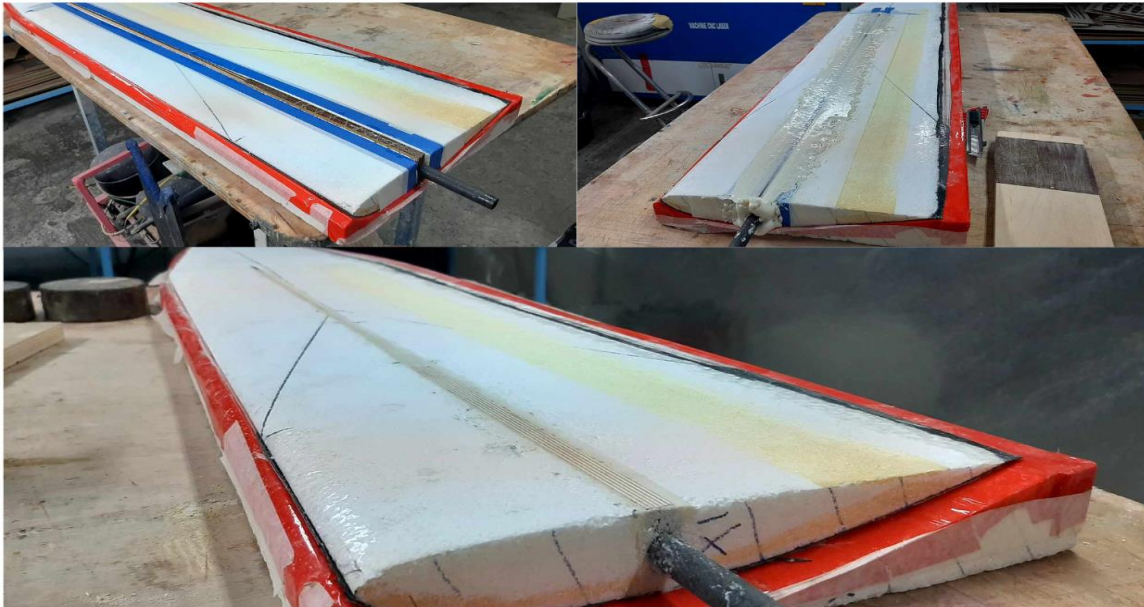


FIGURE 2. 39: Positionnement du longeron et application de mousse expansive

- **Montage dernière nervure**

Après avoir terminé la mise en place du longeron, nous avons procédé à l'installation de la dernière nervure. Pour cela, nous avons découpé avec précision une cavité dans la mousse à l'emplacement prévu, en veillant à respecter les dimensions exactes de la pièce afin de garantir un ajustement optimal.

La nervure a ensuite été positionnée dans son logement, puis fixée à l'aide d'un mélange de mousse expansive PU 600 et de résine époxy. Cette combinaison permet non seulement de combler les interstices de manière homogène, mais aussi d'assurer une excellente cohésion entre la mousse et la nervure, renforçant ainsi la structure dans une zone critique soumise à d'importantes contraintes mécaniques.



FIGURE 2. 40: Mise en place de la nervure finale dans la structure de la demi-aile

3. Revêtement composite et emballage sous vide

Le revêtement composite assure légèreté, solidité et durabilité. Il est constitué de tissus imprégnés de résine époxy, offrant une excellente cohésion et une résistance mécanique élevée, notamment dans les zones sensibles renforcées.

3.1 Préparation de la surface

Avant toute application du composite, plusieurs étapes préparatoires sont nécessaires :

- Ponçage léger de la surface en mousse pour améliorer l'adhérence de la résine.
- Élimination des poussières à l'aide d'un chiffon sec ou d'un soufflage à l'air comprimé.

3.2 Découpe et positionnement des tissus

- Le tissu en fibre de verre est découpé selon les dimensions de la demi-aile, avec une marge de sécurité de 2 à 3 cm de chaque côté pour assurer un recouvrement complet.
- Une bande de Kevlar, d'environ 2 cm de largeur, est découpée dans le sens de la longueur. Elle est placée le long de la demi-aile sur une zone critique, telles que les volets ou les ailerons, pour renforcer localement la structure.
- Une cravate en fibre de carbone découpée à des dimensions précises.

- Une couche de plastique rugueux a été préparée. Elle constituera la couche externe finale du stratifié, apportant une protection supplémentaire et améliorant l'adhérence de la surface.

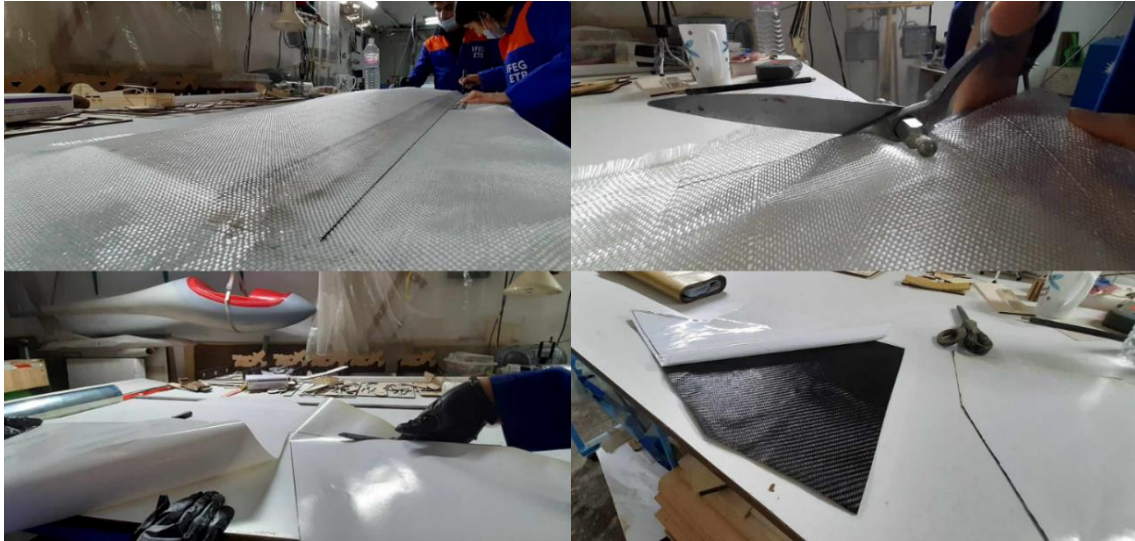


FIGURE 2. 41: Découpe précise des tissus pour stratification

4. Application de résine

4.1 Préparation de la résine

Nous avons commencé par préparer la résine en respectant le rapport préconisé (100 g de résine (élément A) pour 30 g de durcisseur (élément B)). Après avoir mélangé les composants pendant 5min nous avons obtenu un mélange parfaitement homogène, prêt à être utilisé.



FIGURE 2. 42: Préparation de la résine

4.2 Application de Composites Renforcés

Pour garantir une stratification homogène et renforcer les zones sollicitées, Nous avons procédé à la préparation des couches avant leur transfert sur la structure.

Sur une table propre et plane, nous avons déposé une couche de plastique rugueux avant de successivement installer une première couche de tissu en fibre de verre. Dès la mise en place de cette couche, une cravate en fibre de carbone a été soigneusement positionnée aux endroits stratégiques au niveau de l'emplanture.

À chaque dépôt de tissu, nous avons appliqué de la résine époxy à l'aide d'un pinceau ou d'un rouleau, en commençant par le centre et en progressant vers les bords, afin d'assurer une imprégnation régulière de la matière. Pour éviter toute inclusion d'air entre les couches, nous avons utilisé un rouleau débulleur que nous passions minutieusement entre chaque stratification.

La cravate en fibre de carbone joue un rôle essentiel en renforçant localement la structure, en répartissant mieux les charges mécaniques et en limitant les risques de fissuration ou de décollement sous contrainte.

Grâce à cette méthode, nous avons obtenu un stratifié de qualité, combinant légèreté, robustesse et fiabilité, prêt à être transféré sur la mousse pour la suite de l'assemblage.

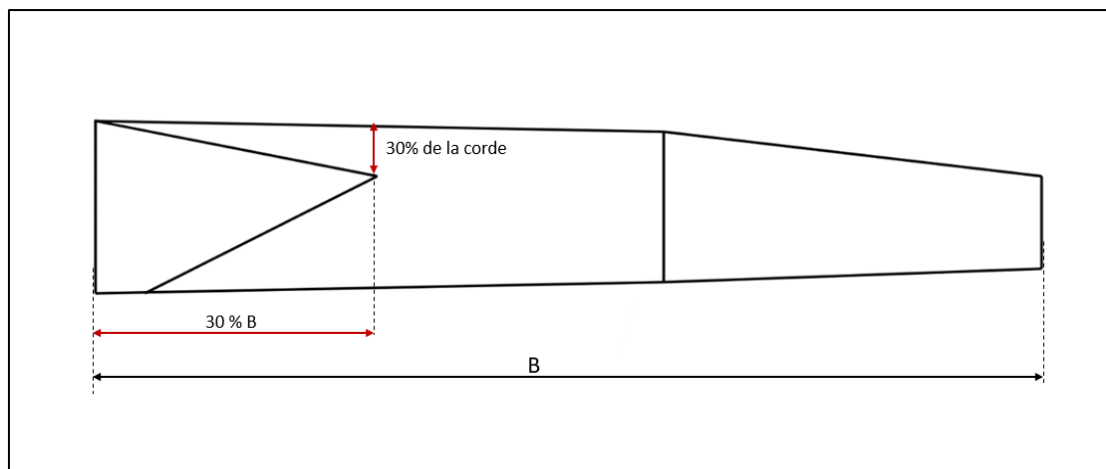


FIGURE 2. 43: Orientation de cravate

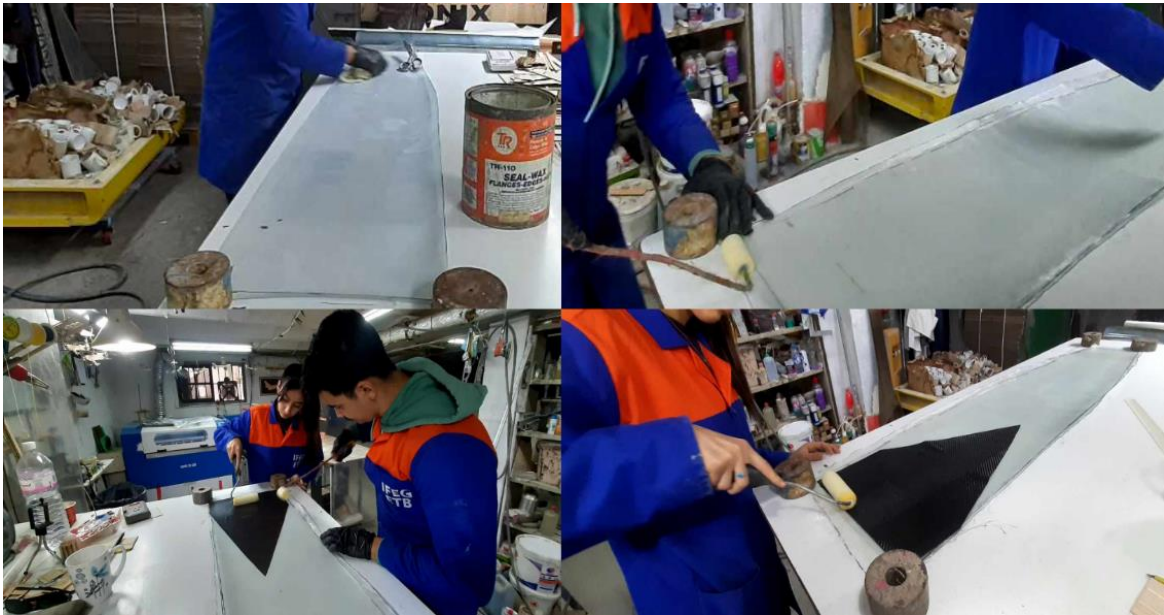


FIGURE 2. 44: Application successive des couches



FIGURE 2. 45: État final des couches composites

5. Transfert sur la mousse

Une fois l'ensemble des couches bien imprégné, nous avons délicatement soulevé le stratifié et l'avons positionné sur la surface en mousse. Cette méthode nous a permis de mieux contrôler la répartition de la résine et d'assurer un transfert précis sans défauts.



FIGURE 2. 46: Transfert de la stratification sur la mousse



FIGURE 2. 47: Fin de l'opération de stratification

6. Emballage sous vide

Afin d'assurer une compaction parfaite du tissu et d'éliminer toute présence d'air, un procédé sous vide a été mis en place :

- Nous avons d'abord verrouillé mécaniquement le moule en insérant la demi-aile entre les deux demi moules, puis serré uniformément les brides. L'ensemble sera maintenu en pression pendant la mise sous vide, et un contrepoids sera ajouté pour assurer une stabilité maximale.

- Nous avons raccordé une pompe à vide à un sac sous vide adapté.
- La pression a été ajustée à une valeur de -0,8 à -1 bar, permettant de garantir une pression uniforme sur l'ensemble de la surface à stratifier.
- Un contrôle rigoureux a été effectué pour s'assurer qu'aucune fuite n'était présente dans le sac, et que la pression a été maintenue de manière constante pendant toute la phase de durcissement.



FIGURE 2. 48: Mise en place du système sous vide

7. Démoulage et corrections de surface

Après polymérisation complète de la résine, nous avons procédé à la dépressurisation et retiré le sac sous vide, puis séparé les demi-moules.

Ensuite, nous avons examiné la demi-aile pour repérer les bulles, irrégularités ou surplus de résine. Un léger ponçage ciblé a uniformisé la surface, lui donnant une finition soignée, prête pour la peinture et l'assemblage final.

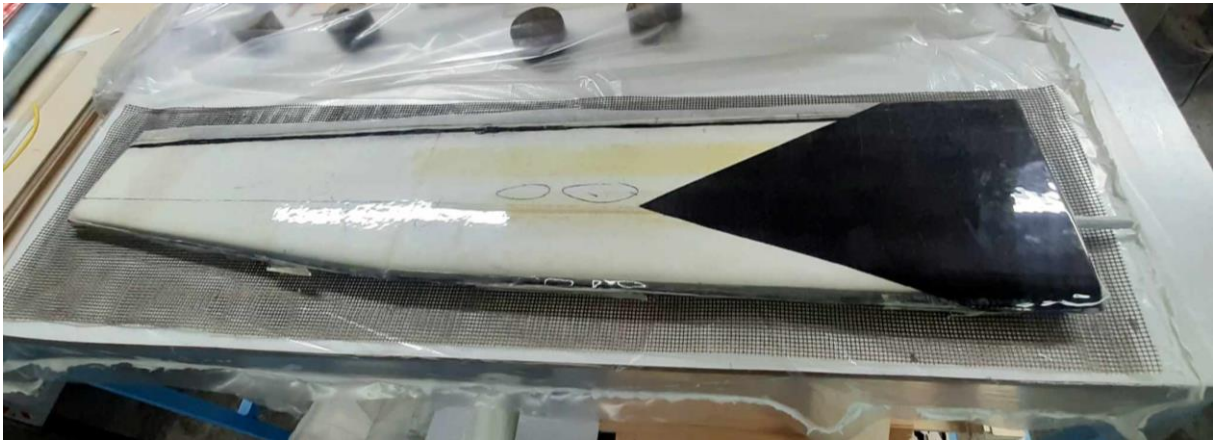


FIGURE 2. 49: Demi-aile finale après fabrication

2.12 Conclusion

Ce chapitre retrace une démarche concrète de rétro-ingénierie appliquée à la reproduction d'une demi-aile de drone à voilure fixe. Sans documentation technique d'origine, nous avons pu reconstituer fidèlement la géométrie de la pièce à partir d'un modèle existant, en combinant plusieurs outils : numérisation 3D, logiciels de traitement de données, modélisation sur SolidWorks, et fabrication en matériaux composites via découpe CNC et moulage sous vide.

Cette approche rigoureuse nous a permis d'obtenir une pièce à la fois précise, fonctionnelle et bien finie. Bien qu'il ne s'agisse que d'un élément du drone, la fabrication de la demi-aile a joué un rôle clé, tant d'un point de vue technique que méthodologique, en validant le processus adopté et en montrant la pertinence de la rétroconception dans un cadre réel.

Au-delà de l'aspect technique, ce travail souligne l'intérêt stratégique de la rétro-ingénierie : elle permet de refabriquer des pièces complexes, de réduire les délais de développement et d'améliorer des produits existants.

En résumé, cette expérience montre que la maîtrise des outils numériques et des procédés de fabrication avancés permet de répondre efficacement aux exigences modernes de l'ingénierie

CHAPITRE III : Analyse Modale

III. Introduction

Ce chapitre présente les bases des vibrations et de l'analyse modale appliquées sur la demi aile de drone réalisée. L'étude des vibrations permet d'analyser le comportement dynamique de la structure et d'identifier ses fréquences critiques.

L'analyse modale est abordée sous trois angles : théorique expérimentale et numérique.

L'objectif est de comparer ces approches, leurs avantages et leurs limites, pour une caractérisation précise des modes propres.

3.1 Notions de base vibrations

3.1.1 Définition

La vibration se définit comme un mouvement oscillatoire d'un corps ou d'un système mécanique autour de sa position d'équilibre statique. Ce mouvement peut être de nature périodique ou apériodique. Un système est considéré comme en état vibratoire lorsqu'il subit un déplacement alternatif autour de sa position d'équilibre, généralement sous l'effet de sollicitations internes ou externes.[1]

Dans le cas des machines tournantes, les vibrations constituent l'un des indicateurs les plus sensibles de l'apparition de contraintes mécaniques, thermiques ou électromagnétiques. Celles-ci peuvent être générées par des sources telles que la friction, des variations de pression, des gradients thermiques, ou encore des excitations mécaniques ou électriques.

Le phénomène vibratoire est transversal à de nombreux domaines scientifiques et industriels, notamment la génie mécanique, l'aéronautique, la physique appliquée, l'électronique embarquée et la biophysique. En fonction de leurs caractéristiques (fréquence, amplitude, mode de propagation), les vibrations peuvent engendrer des effets fonctionnels positifs (comme dans certaines techniques de diagnostic ou d'usinage) ou, au contraire, des conséquences délétères telles que la fatigue structurelle, le désalignement ou la défaillance prématurée des composants.

3.1.2 Avantages et inconvénients des vibrations

Avantage	Description
Détection et diagnostic	Les vibrations sont un indicateur essentiel pour la détection de défauts dans les machines, les structures ou les systèmes biologiques (ex : surveillance vibratoire des ponts, diagnostic médical par ultrasons, etc.).
Utilisation dans les procédés industriels	Les vibrations contrôlées peuvent améliorer certains procédés : usinage assisté par vibrations, compactage vibratoire, soudage par vibration, etc.
Applications en médecine	En thérapie, les vibrations sont utilisées dans la rééducation musculaire, la physiothérapie ou le traitement de certains troubles neurologiques.
Transport et manipulation de matériaux	Les systèmes vibrants (convoyeurs vibrants, tamis vibrants) sont couramment utilisés dans l'industrie pour transporter, trier ou compacter des matériaux.
Amélioration de la recherche scientifique	L'étude des vibrations permet de mieux comprendre le comportement dynamique des structures, des matériaux ou des systèmes biologiques complexes.

Inconvénient	Description
Fatigue et défaillance des structures	Les vibrations répétées peuvent provoquer la rupture ou la déformation de composants mécaniques, de structures civiles (ponts, bâtiments), ou biologiques.
Nuisance sonore	Les vibrations sont souvent accompagnées de bruit (machines industrielles, moteurs, transports), ce qui peut nuire au confort et à la santé (troubles auditifs, stress).
Inconfort et effets physiologiques	L'exposition prolongée aux vibrations (notamment dans les transports ou le travail avec des machines portatives) peut entraîner des troubles musculo-squelettiques ou neurologiques.
Perte de précision	Dans des systèmes sensibles (micromécanique, optique, électronique), les vibrations peuvent nuire à la stabilité, la précision ou la qualité de fonctionnement.
Coûts de maintenance accrus	Les vibrations excessives accélèrent l'usure, nécessitent des contrôles fréquents et augmentent les coûts de maintenance ou de remplacement.

3.2 Analyse modale

La maîtrise des études vibratoires s'est considérablement renforcée grâce aux avancées dans le domaine de l'analyse modale. Les approches actuelles, qu'elles soient expérimentales ou

numériques, s'appuient sur des outils sophistiqués permettant d'évaluer avec précision l'influence des modifications structurelles, à partir d'un modèle prédictif fiable. Lorsqu'un modèle expérimental ou numérique est disponible, ces outils permettent une évaluation fine de la réponse dynamique de la structure. De nombreux logiciels spécialisés en analyse modale expérimentale intègrent ces méthodes et fournissent des solutions robustes basées sur les caractéristiques modales extraites de la structure étudiée.[2]

L'analyse modale englobe l'ensemble des techniques permettant de déterminer les caractéristiques dynamiques des structures mécaniques à savoir : les fréquences propres, les facteurs d'amortissement et les déformées modales.[3]

L'analyse dynamique des structures par l'approche modale repose essentiellement sur l'étude des modes de vibration et dans ce domaine on distingue trois catégories d'approches :

- **Analytique ou théorique (AMT)** : On utilise les équations du mouvement basées sur la mécanique.[2]
- **Expérimentale (AME)** : Basée sur des mesures physiques (accéléromètres, marteau d'impact, vibration forcée).[2]
- **Numérique (AMN)** : Approche par modélisation numérique (généralement éléments finis, FEM).[2]

En résumé, l'analyse modale est un processus permettant de caractériser une structure à travers ses propriétés dynamiques intrinsèques, à savoir ses fréquences propres, ses taux d'amortissement et ses modes propres de vibration.

Ces paramètres décrivent le comportement vibratoire naturel de la structure et constituent une base essentielle pour son analyse dynamique.

3.3 Analyse modale théorique

L'analyse modale théorique constitue une méthode essentielle pour étudier les propriétés dynamiques des systèmes mécaniques. Elle repose sur la résolution mathématique des équations de mouvement d'un système linéaire, généralement formulées sous la forme d'un système d'équations différentielles du second ordre.[2]

Une analyse modale théorique de la demi-aile d'un drone est réalisée. Cette demi-aile, conçue en matériau composite sandwich (fibres de verre, carbone et kevlar), possède une géométrie et des propriétés complexes. Pour simplifier l'étude tout en conservant l'essentiel du comportement vibratoire, la structure est modélisée comme une poutre en porte-à-faux (encastée-libre), puis représentée par un système discret à deux degrés de liberté (2 DDL).

L'objectif est de déterminer, de manière analytique, la première fréquence propre ainsi que le mode de vibration associé, qui correspond à la fréquence à laquelle le système tend à vibrer spontanément

3.3.1 Hypothèses et modélisation

On considère la demi-aile comme une poutre. Comme première approche, on considère la poutre comme élément linéique. [4]

- De type encastée-libre (fixée à la base, libre à l'extrémité)
- En matériau composite homogène (modèle simplifié)
- De longueur $L=1.5\text{m}$
- De largeur $b= 0.29\text{m}$
- De hauteur $h= 0.043\text{m}$
- De module d'élasticité $E = 40 \times 10^9 \text{ Pa}$
- Densité $\rho = 1700 \text{ Kg/m}^3$

3.3.2 Propriétés mécaniques de la poutre

- Aire de section $A = b \cdot h = 0.29 \cdot 0.043 = 1.247 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$
- Moment d'inertie (section rectangulaire) $I = \frac{bh^3}{12}$

$$I = \frac{(0.29) \cdot (0.043)^3}{12} = 1.921 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$
- Masse linéique $\mu = \rho \cdot A = 1700 \cdot 1.247 \cdot 10^{-2} = 21.199 \text{ Kg/m}$

3.3.3 Formulation des fréquences propres

- Pour une poutre encastée à une extrémité et libre à l'autre (Euler-Bernoulli) la fréquence propre de n-ième mode est donnée par :

$$f_n = \left(\frac{B_n^2}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (3.1)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad (3.2)$$

Où :

- β_n est la constante dépendant des conditions aux limites et du mode.
- $\beta_n = \frac{\lambda_n}{L}$ avec $\lambda_1 \approx 1.875$.
- λ_1 est une valeur propre (Première racine pour le cas encastré-libre).

3.3.4 Application numérique

- 1er mode

$$\beta_1 = \frac{1.875}{1.5} = 1.25 \text{ rad/m}$$

$$f_1 = \frac{(1.25)^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{40 \times 10^9 \cdot 1.921 \times 10^{-6}}{21.199}}$$

$$f_1 = 0.2486 \cdot 50.506 \approx 14.971 \text{ Hz}$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2 \cdot \pi \cdot 14.971 = 94.071 \text{ rad/s}$$

L'analyse théorique menée sur le premier mode de vibration d'une poutre encastrée-libre fournit une estimation initiale des caractéristiques dynamiques de la demi-aile. Cette modélisation servira de référence pour l'analyse expérimentale présentée dans la suite du travail.

3.4 Analyse modale expérimentale

L'analyse modale expérimentale permet d'identifier les caractéristiques vibratoires d'une structure à partir de mesures physiques, notamment les fréquences propres et les formes modales. Elle repose sur l'excitation de la structure et l'enregistrement de sa réponse dynamique. Dans cette étude, cette méthode est appliquée à la demi-aile de drone modélisée comme une poutre encastrée-libre.[5]

Pour sa mise en œuvre, un dispositif complet d'instrumentation a été déployé. Il comprend les éléments nécessaires à l'excitation, à la détection, à l'acquisition et au traitement des signaux vibratoires.

Cette configuration, est appelée chaîne de mesure, permet de transformer les grandeurs physiques mesurées sur la structure en données exploitables via un logiciel d'analyse dédié.

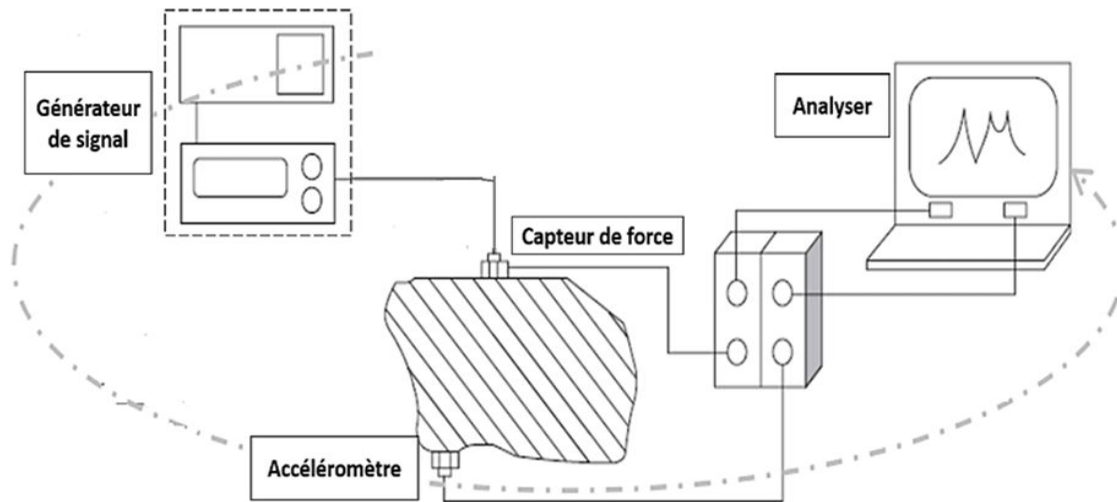


FIGURE 3. 1: Chaîne de mesure de vibration [5]

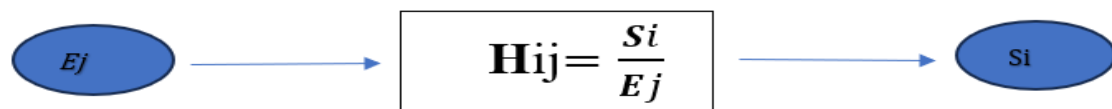
3.4.1 Principe de mesure

Dans la plupart des cas, la structure est excitée en un seul point et les réponses sont mesurées en plusieurs autres points. La structure est excitée par une force de direction.

Les mesures FRF sont souvent données sous forme de spectres lissés ou moyennés, constitués de plusieurs pics. Les pics individuels sont souvent étroits avec des fréquences centrales identifiables, chaque pic indique qu'il y a résonance, qui représente la réponse d'un système à un seul degré de liberté.[5]

3.4.2 Fonction de réponse en fréquence (FRF)

En général, On décrit le comportement dynamique d'une structure en termes de sa fonction de transfert, où la structure est considérée comme un système (boîte noire) qui est soumis à des entrées (E_j) et émet des sorties (S_i).[5]



H_{ij} : la fonction de réponse en fréquence.

E_j : Force ou moment (l'entrée).

S_i : Déplacement, vitesse ou accélération (la sortie).

La fonction de réponse en fréquence (FRF) est simplement définie comme le rapport entre la réponse de sortie d'une structure (déplacement, vitesse ou accélération) et la force appliquée pour l'exciter.

3.4.3 Matériel utilisé

Dans notre étude, nous avons utilisé :

- **Un marteau d'impact** : Dynapulse™ comme outil d'excitation de la demi-aile, de référence 5800B5 équipé d'un capteur de force qui nous permet de mesurer la force d'excitation des structures, ses caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau
- **Embout de marteau** : son effet est déterminant dans la durée d'impulsion, la forme du spectre et la gamme opérationnelle en fréquence. La rigidité de l'embout et de la masse du marteau, ainsi que la structure, jouent un rôle important dans ce phénomène.

En fait, lors de la frappe d'une structure solide, la dureté de l'embout influence sur la forme du spectre et la gamme opérationnelle en fréquence.



FIGURE 3. 2: Marteau et embouts

TABEAU 3. 1: Caractéristiques techniques du marteau

Paramètre	Valeur
Fréquence de résonance (Hz)	75
Sensibilité (mv/g)	1.16
Impédance masse de sortie (ohm)	100
Source d'alimentation (v)	+18 à 30
Intensité (mA)	2 à 20
Matériaux (tête, poignet)	Acier inoxydable, fibre de verre
Poids tête (g)	100
Connecteurs	Coaxial BNC
Référence du marteau	5800B5

- **Un accéléromètre** : un capteur de vibration qui est installé sur la structure à étudier, afin de mesurer sa réponse après excitation. Nous avons choisi l'accéléromètre de type Wilcoxon de Référence 736T SN 13712.

**FIGURE 3. 3: Accéléromètre**

Les caractéristiques techniques de ce capteur sont illustrées dans le tableau suivant :

TABEAU 3. 2: Caractéristiques techniques de l'accéléromètre 736T Sn 13712

Paramètres	Valeur
Gamme de fréquences	5Hz-10KHz
Sensibilité	97mV/g
Plage de mesure	Jusqu'à 20 Kilo g
Fréquence de résonance	> 45.2 kHz

Cet accéléromètre est doté de caractéristiques techniques impressionnantes, qui offre une gamme dynamique étendue et une précision élevée.

Les données recueillies seront ensuite traitées par le logiciel d'analyse modale CATSMODAL afin de déterminer les paramètres dynamiques de ces structures, à savoir les fréquences propres et déformées modales.

3.4.4 Acquisition et traitement des données

Pour acquérir les données et analyser les signaux transmis par les deux capteurs (capteur de force et accéléromètre), nous allons utiliser la plateforme informatisée d'analyse vibratoire de SPECTRAL DYNAMICS, qui se compose de :

- **Carte d'acquisition** : permet de transférer les signaux provenant des capteurs au PC pour les analyser.
- **Ordinateur principal** : Le PC bureautique est utilisé d'une part comme support de cartes d'acquisition de type PCI, et d'autre part pour l'installation de logiciels d'acquisition et de traitement de données.



FIGURE 3. 4: plateforme spectrale dynamique

3.4.5 Logiciels utilisés

L'analyse modale expérimentale est réalisée à l'aide de deux logiciels de SPECTRAL DYNAMICS :

PUMA

- Acquisition des signaux (réponse et excitation).
- Enregistrement des signaux sous différents formats (SDD ou UFF).

CATSMODAL

- Détermination des paramètres modaux.
- Visualisation des déformées modales des structures

3.4.6 Fixation et Discrétisation de la demi-aile

Avant de démarrer l'analyse modale expérimentale, il est important de fixer la demi-aile dans des conditions encastrées/libres en utilisant un tasseau sur une table. Ensuite, la demi-aile est discrétisée en 28 points disposés selon une forme matricielle, avec des distances prédéfinies entre les points, comme illustré dans la figure 3. 5. L'accéléromètre est attaché au point 27 pour mesurer la réponse pendant l'excitation.

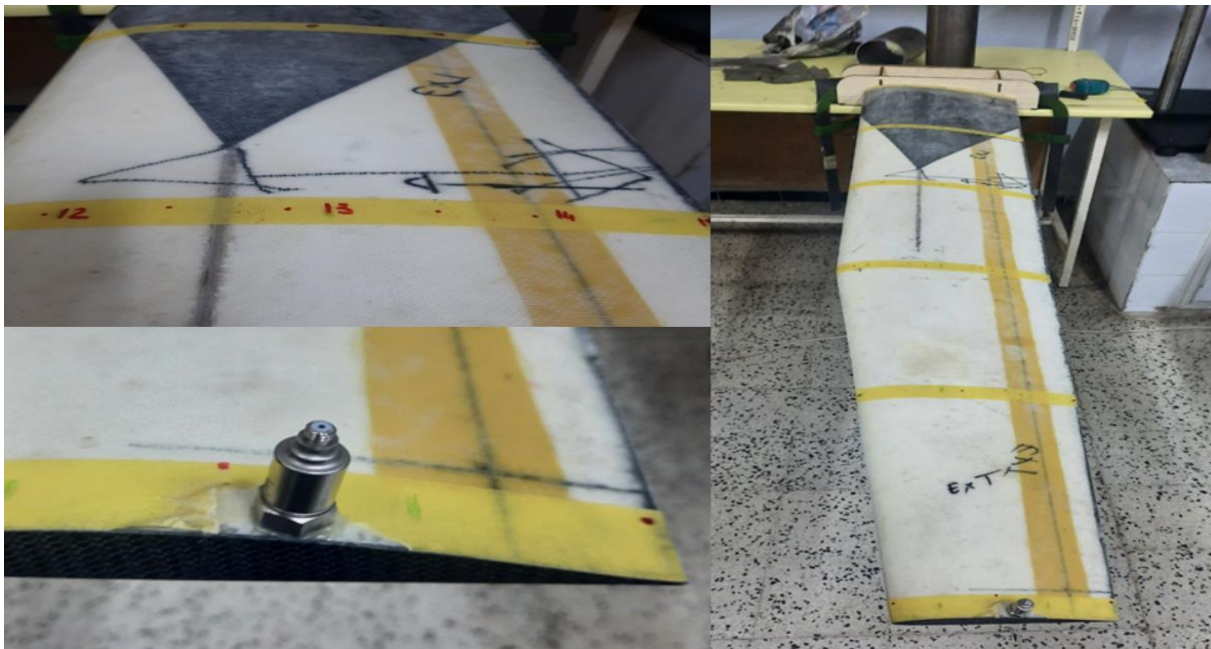


FIGURE 3. 5: fixation et discrétisation de la demi-aile

3.4.7 Réglage des paramètres d'acquisition sur PUMA

Dans la fenêtre PUMA Local, nous avons cliqué sur Setup (Configuration) puis sur Acquisition.

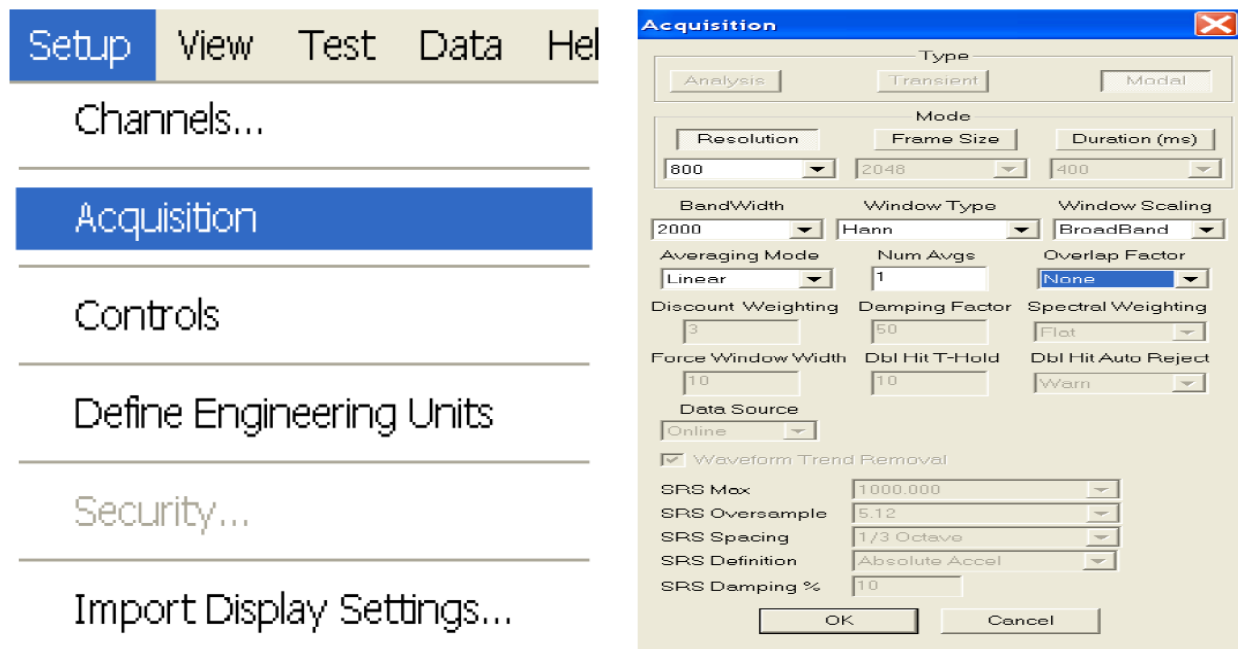


FIGURE 3. 6: Paramètres d'acquisition de configuration PUMA

Ensuite, configuration du tableau des canaux voir figure 3.7. Nous sommes donc dans la fenêtre PUMA Local et nous utilisons la partie Channel (Canaux) dans la fenêtre de configuration.

Channel Definition												
	Name	Serial #	Type	Engineering Units	Sensitivity (mv/Unit)	Transducer Units	ICP	Coupling	Voltage	dB Reference	Location	Direction
1	CH 1	MARTEAU	Ref / Measure	g	1.160	g	On	AC	Auto	1	1 Z	
2	CH 2	13712	Measure	g	97.000	g	On	AC	Auto	1	27 Z	
3	CH 3		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	3 X	
4	CH 4		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	4 X	
5	CH 5		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	5 X	
6	CH 6		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	6 X	
7	CH 7		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	7 X	
8	CH 8		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	8 X	
9	CH 9		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	9 X	
10	CH 10		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	10 X	
11	CH 11		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	11 X	
12	CH 12		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	12 X	
13	CH 13		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	13 X	
14	CH 14		Inactive	g	100.000	g	Off	Ground	Auto	1	14 X	

FIGURE 3. 7: Réglage des paramètres de Chanel

Nous devons maintenant configurer le stockage des données. Cela nous permet de sélectionner différents types de mesures, schéma de dénomination des fichiers et de choisir un format de stockage que notre logiciel.



FIGURE 3. 8: Panneau de contrôle

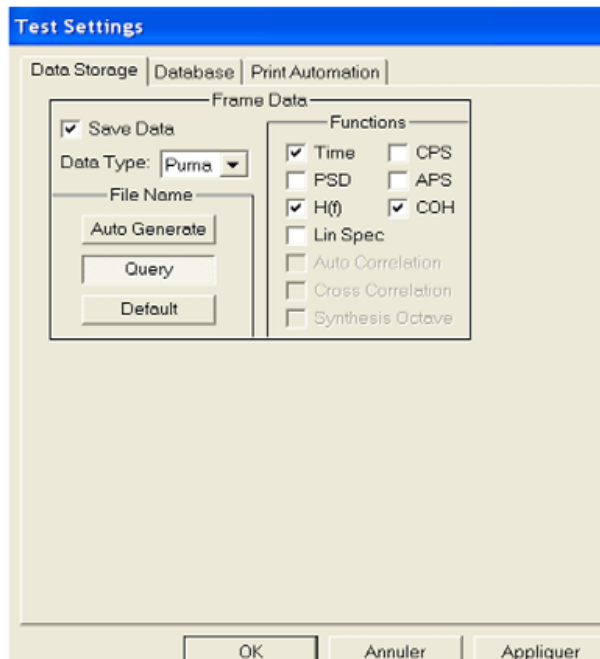


FIGURE 3. 9: Réglage des paramètres de test



FIGURE 3. 10: Réglage de l'armement (marteau d'impact)

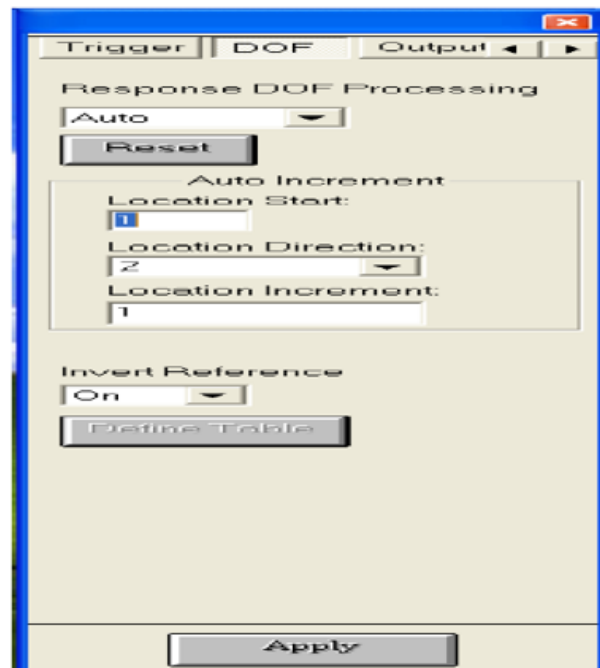


FIGURE 3. 11: Réglage de degré de liberté

- Modifier les tracés individuels dans le Spectral Dynamics Viewer, afin d'afficher les mesures qui nous intéressent. Pour cette discussion, nous avons utilisé le tracé gauche (CH 1) (Excitation de l'élément d'impact du marteau), et le tracé droit (CH 2) (la réponse de l'accéléromètre).
- Dans une nouvelle page, tracer le graphe au-dessus qui représente la fonction de réponse en fréquence (FRF).

3.4.8 Excitation et mesure de la réponse

Après avoir configuré les paramètres d'acquisition du logiciel PUMA.

- Excitation des 28 points successivement avec le marteau d'impact (Excitation impulsionnelle) et mesure de la réponse de la demi-aile avec l'accéléromètre fixé au point 27.

Les signaux de force et d'accélération sont visualisés instantanément, ainsi que la fonction de réponse en fréquence (FRF), qui représente le rapport entre la réponse et l'excitation et qui sera traité plus tard afin de déterminer les propriétés dynamiques de la demi-aile.

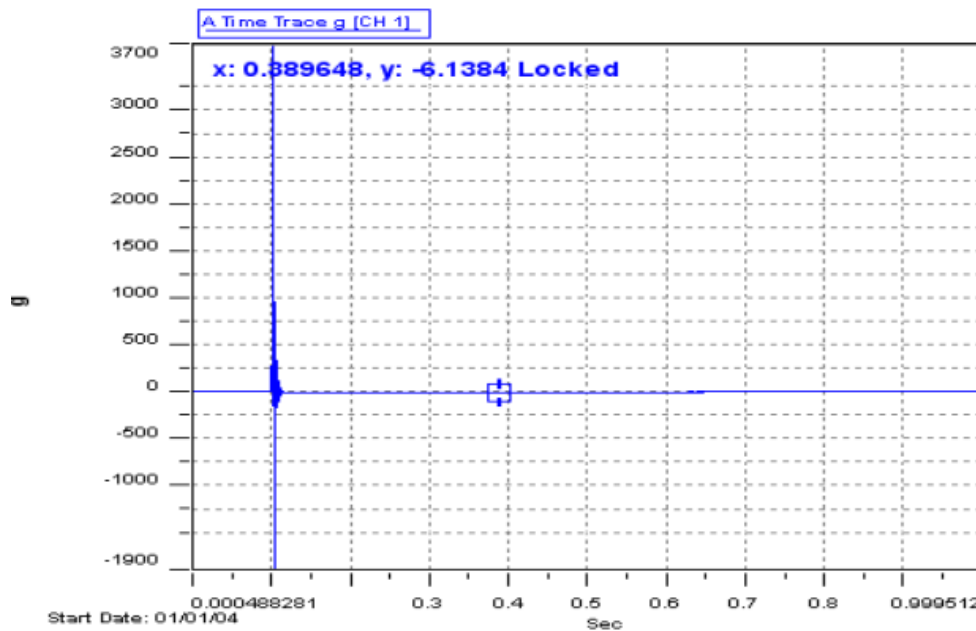


FIGURE 3. 12: Signal d'excitation

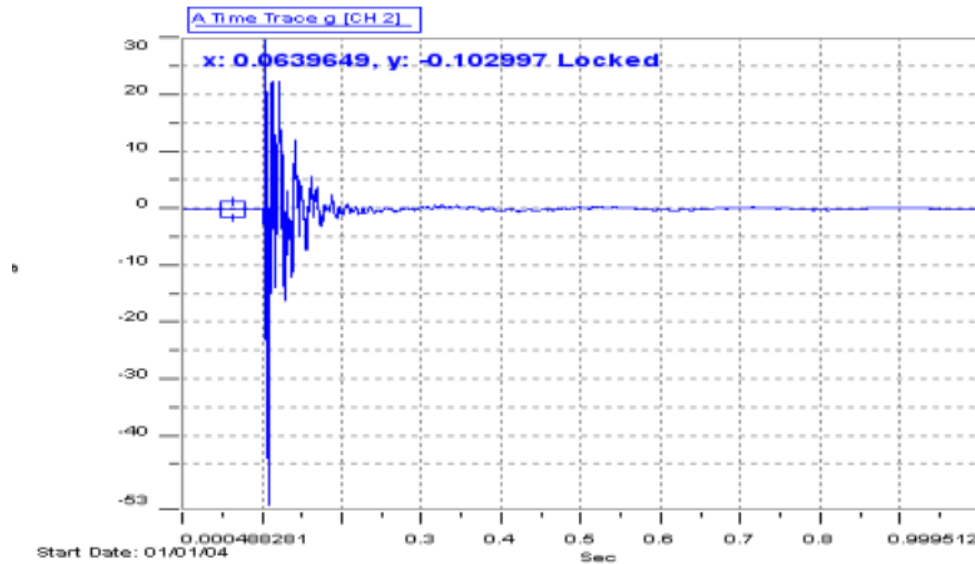


FIGURE 3. 13: Signal de la réponse

En raison de la difficulté à extraire les paramètres dynamiques des structures à partir du rapport entre la réponse et l'excitation dans le domaine temporel, ce rapport est transformé dans le domaine fréquentiel à l'aide de la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Cette transformation permet de décomposer le signal temporel complexe en composantes sinusoïdales, caractérisées par leurs fréquences, amplitudes et phases.

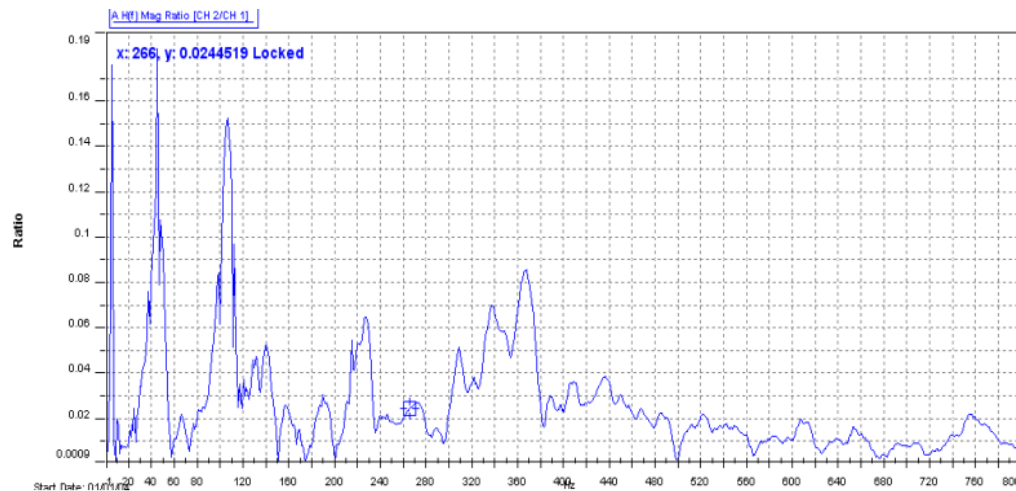


FIGURE 3. 14: Signal de fonction de réponse en fréquence

D'autre part, nous avons utilisé le logiciel de traitement de données Origin pour visualiser les courbes précédentes, ainsi que pour réaliser une étude comparative avec le logiciel CATSMODAL en termes de détermination des fréquences propres à partir des FRF.

Pour obtenir de bons résultats, un seul pic doit apparaître dans la courbe d'excitation.

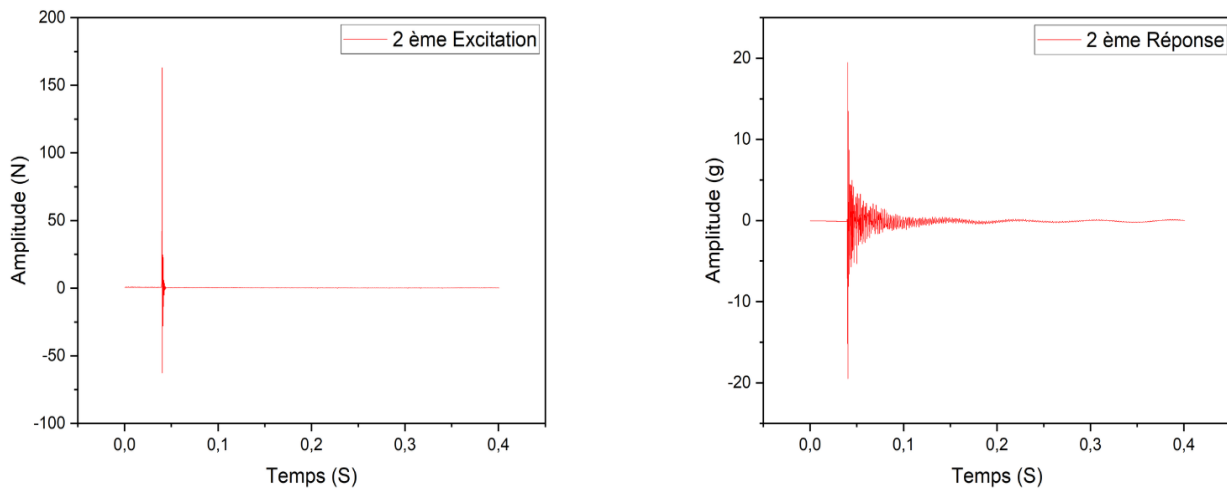


FIGURE 3. 15: L'excitation et la réponse du 2ème point

Nous remarquons que

- Le signal dans la figure ci-dessus a un enregistrement temporel plus long que l'impulsion
- L'amplitude change lorsque nous modifions le taux d'oscillation de la force d'entrée.
- Il y a des augmentations et des diminutions d'amplitude à divers points.
- La réponse temporelle tend à diminuer vers zéro.

La transformation du rapport excitation-réponse dans le domaine fréquentiel (FFT) permet de calculer la Fonction de Réponse en Fréquence FRF, comme la figure montre, il est facile de constater que cette courbe est une succession des pics.

Chaque pic représente une résonance de la structure, pouvant être associée à un système à un degré de liberté. Ainsi, la fonction de transfert considérée est la superposition des fonctions de transfert de chacun des systèmes élémentaires la constituant. Cette courbe sera utilisée ensuite pour extraire les paramètres modaux de la demi aile.

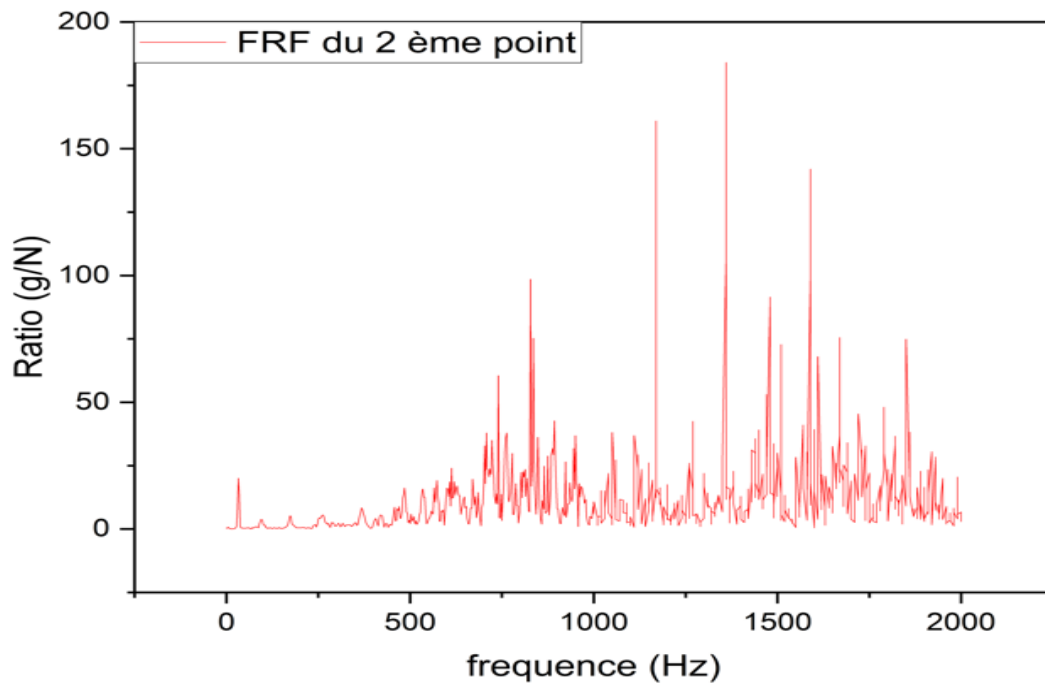


FIGURE 3. 16: Courbe de fonction de réponse en fréquence du 2ème point

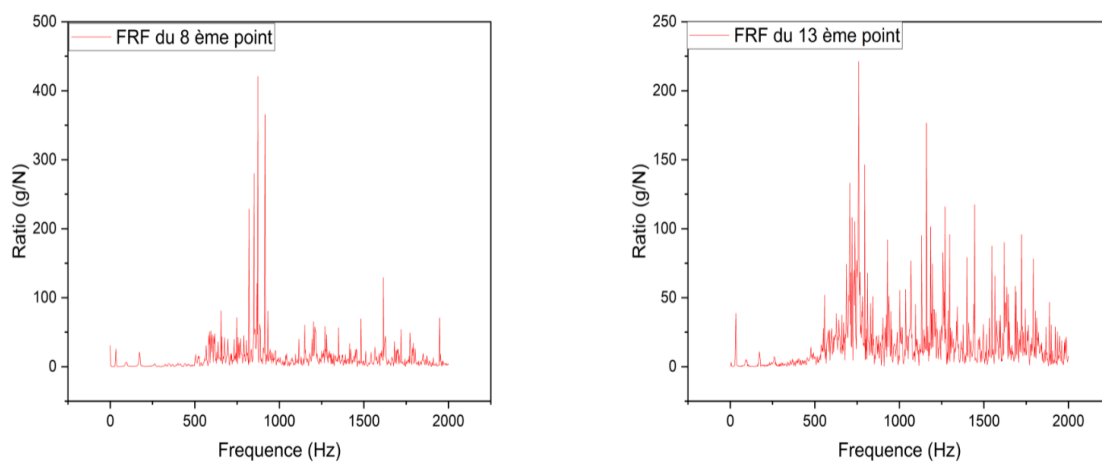


FIGURE 3. 17: Courbe de fonction de réponse en fréquence du 8ème et 13ème point

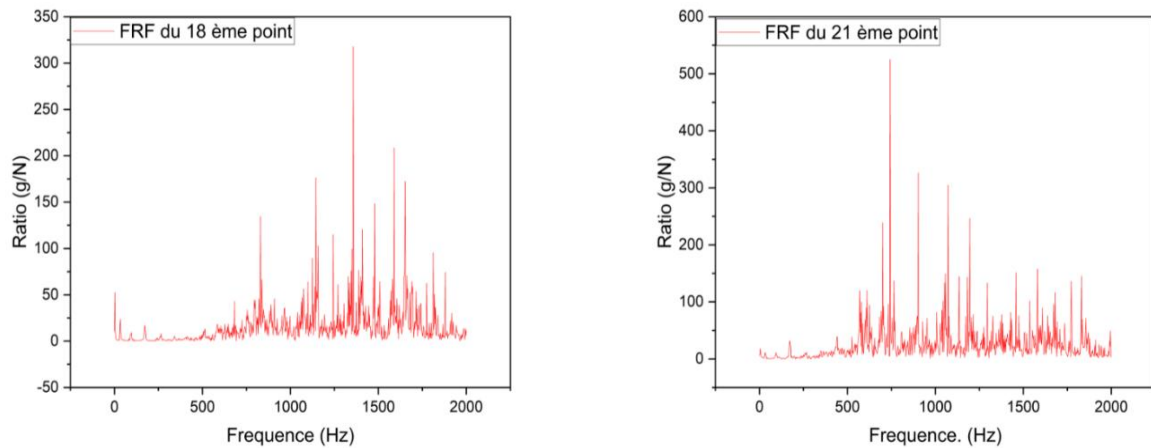


FIGURE 3. 18 : Courbe de fonction de réponse en fréquence du 18ème et 21ème point

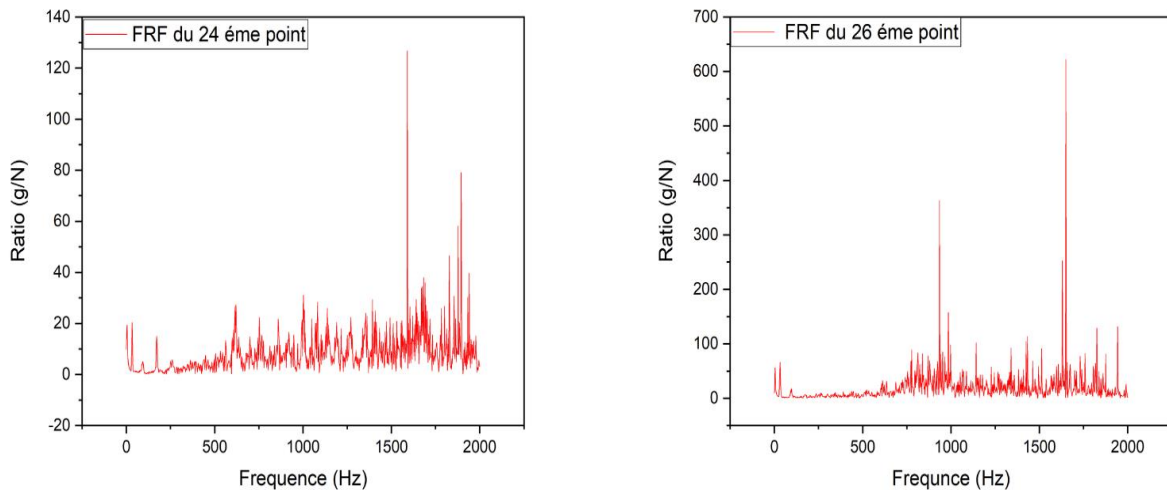


FIGURE 3. 19: Courbe de fonction de réponse en fréquence du 24ème et 26ème point

D'après les courbes des FRFs présentées dans les Figures (3.18/ 3.19 / 3.20), nous constatons que les amplitudes des pics augmentent et diminuent en fonction de la position d'excitation. Cependant, les fréquences de ces pics ne changent pas.

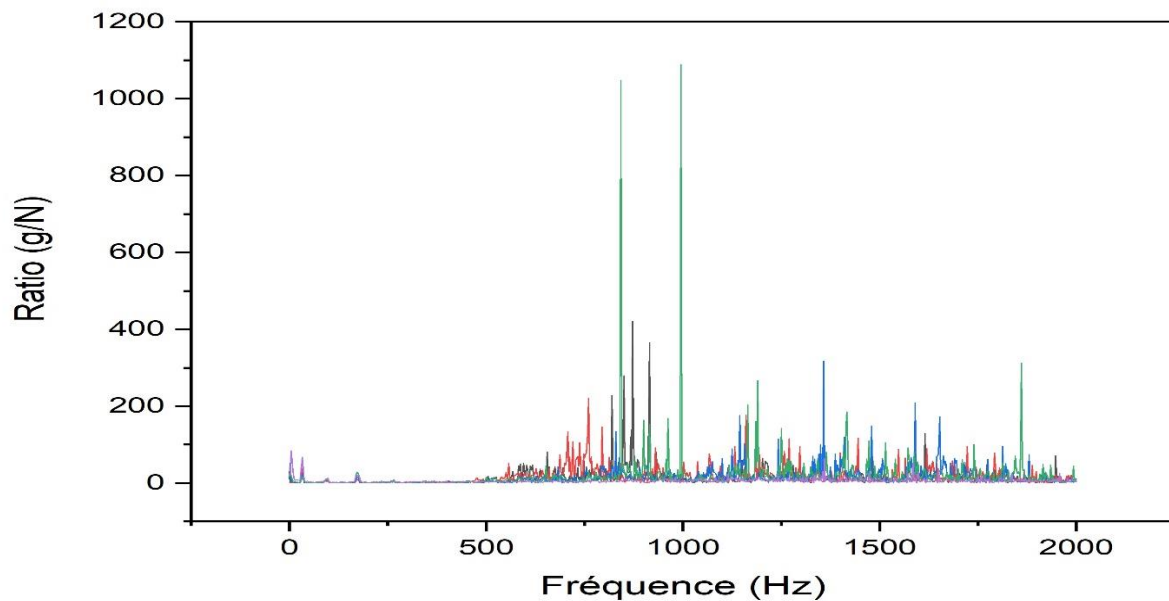


FIGURE 3. 20:Les FRFs des 28 points de la demi-aile

D'après la figure 3. 20, nous remarquons la concentration des pics dans les mêmes fréquences pour toutes les courbes des FRFs, ce qui confirme que les fréquences des pics ne changent pas. Par contre, les amplitudes de ces pics varient selon le point d'excitation.

3.4.9 Détermination des paramètres modaux par CATSMODAL

Après avoir exploité le logiciel PUMA pour effectuer l'acquisition et le prétraitement des données expérimentales, la détermination des paramètres modaux ainsi que la visualisation des déformées modales de la structure sont réalisées à l'aide de CATSModal.

- Modéliser géométriquement la structure à étudier avec CATSMODAL :
Introduire les points d'excitation pour rapprocher de la géométrie de la demi-aile

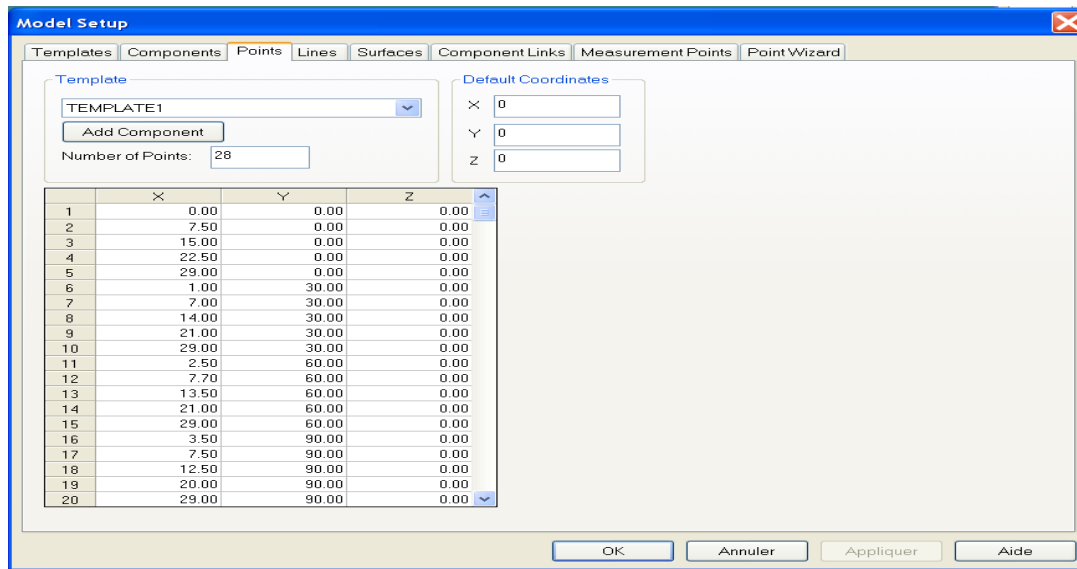


FIGURE 3. 21: Injection des coordonnées pour la modélisation géométrique

- Relier les points entre eux par des lignes pour obtenir une représentation plus claire de la géométrie comme illustré dans la figure 3. 22.

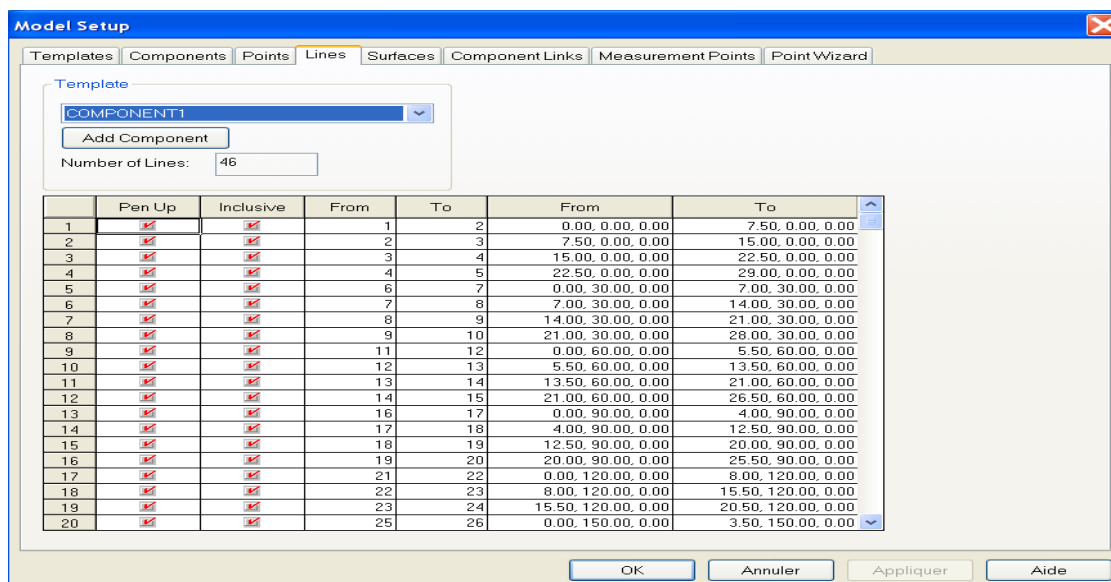


FIGURE 3. 22: Construction des lignes entre les points pour modélisation

Après avoir relier les points, nous obtenons la géométrie finale de la demi-aile, comme présenté dans la figure 3. 23. Cette étape est cruciale pour établir une base solide pour l'analyse modale ultérieure.

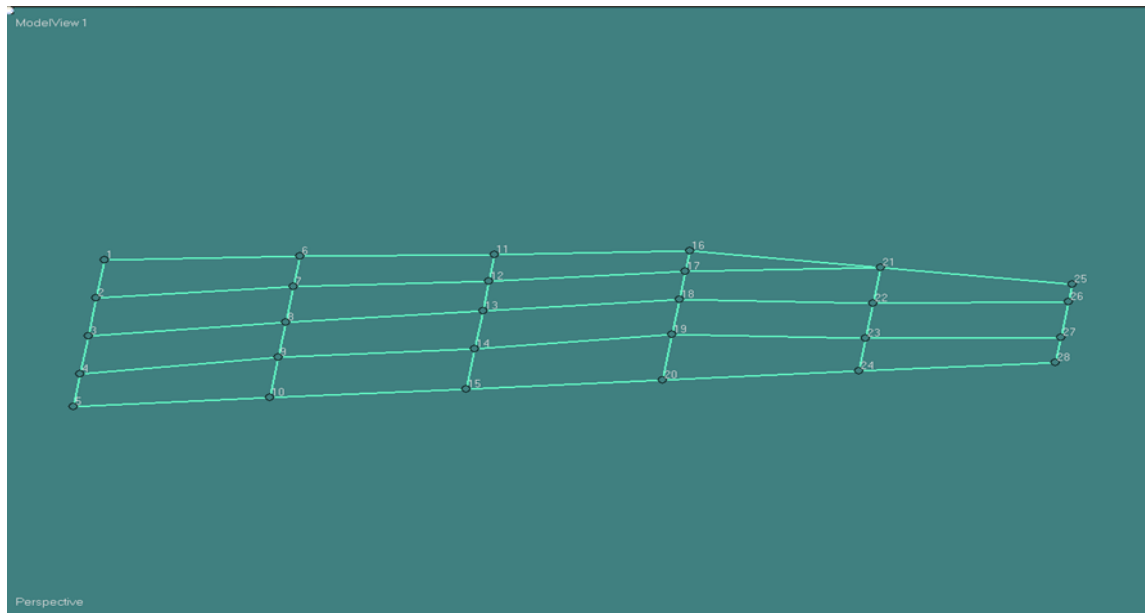


FIGURE 3. 23: Visualisation de la géométrie de la demi-aile

- Importation des fichiers FRFs

Cette étape consiste à importer les fichiers des FRFs enregistrés par le logiciel PUMA

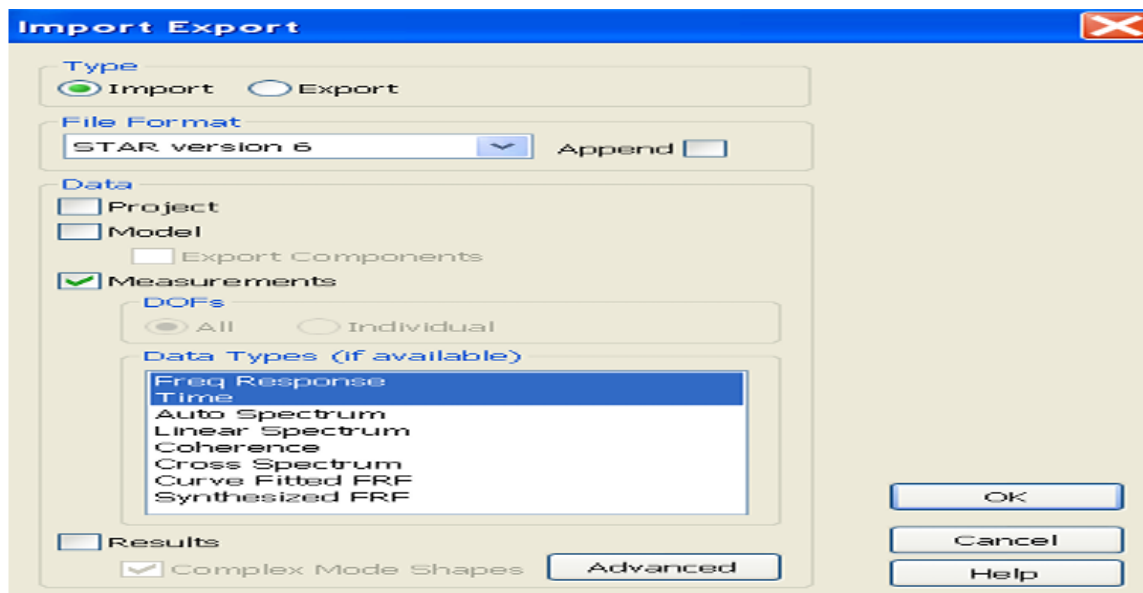


FIGURE 3. 24: Importation des fichiers des FRFs

Une fois ces fichiers importés dans le logiciel CATSMODAL on doit :

- Modifier les paramètres de réponse et d'excitation, les unités de mesure excitation (N) et réponse (g) et la position de l'accélération.

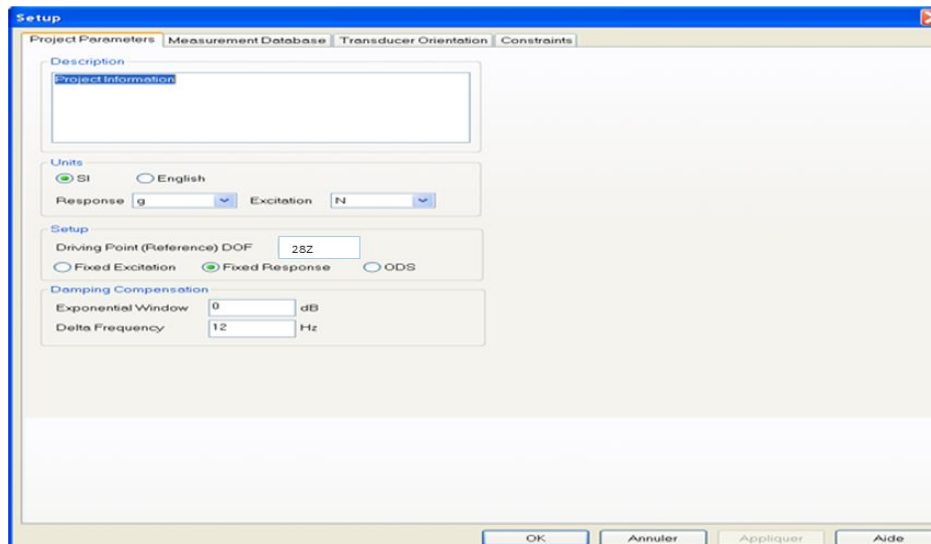


FIGURE 3. 25: Configuration des paramètres de réponse et d'excitation

- Attacher les FRFs importés aux points discrétisés de la demi-aile
- Définir les points 1,2,3,4, et 5 fixes, en raison de mode de fixation encastré libre

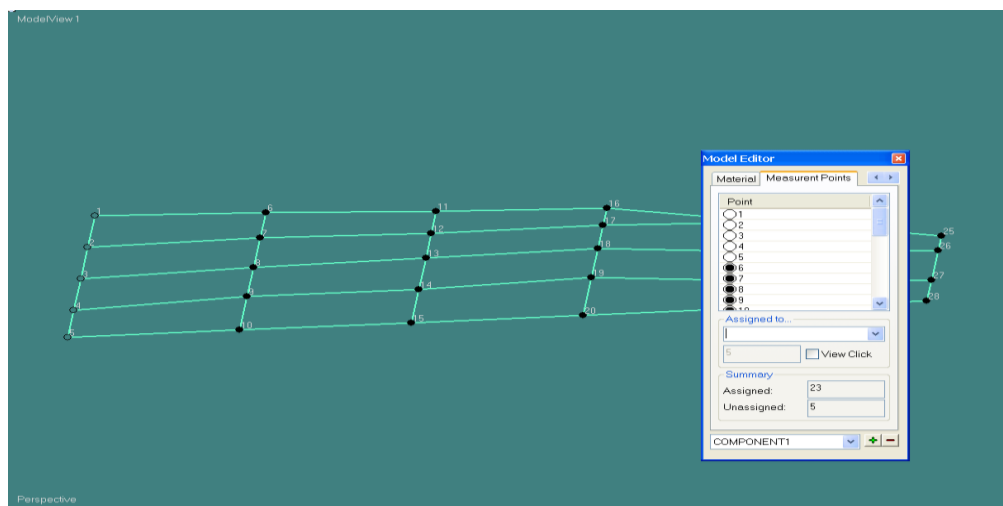


FIGURE 3. 26: Assignment des FRFs aux points de discrétisation

- Décomposition de la courbe FRF en des bandes fréquentielles, où chaque bande contient au moins un pic.
- Lissage de la courbe FRF à l'aide de la méthode polynomiale, disponible sous logiciel CATSMODAL.
- Détermination des pics, qui représentent les fréquences propres.

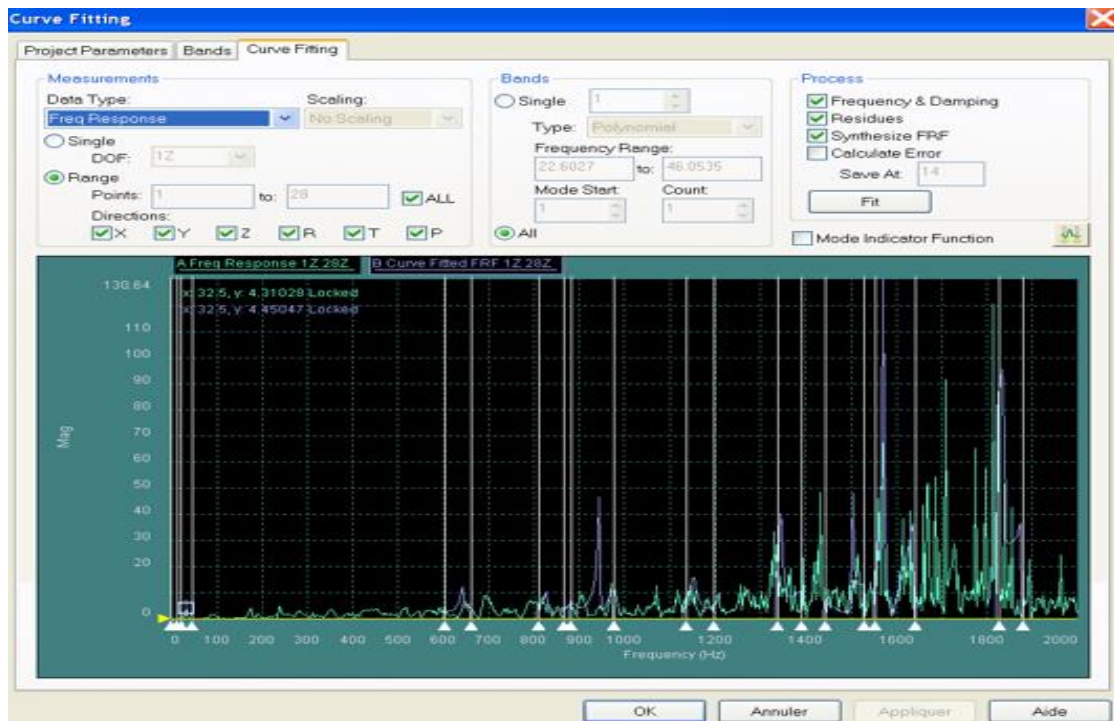


FIGURE 3. 27: Décomposition et Lissage de la courbe FRF

Le logiciel CATSMODAL lisse la courbe FRF (retrace une nouvelle courbe) à l'aide des méthodes numériques, polynomiales dans notre cas, afin de faciliter l'extraction des fréquences propres.

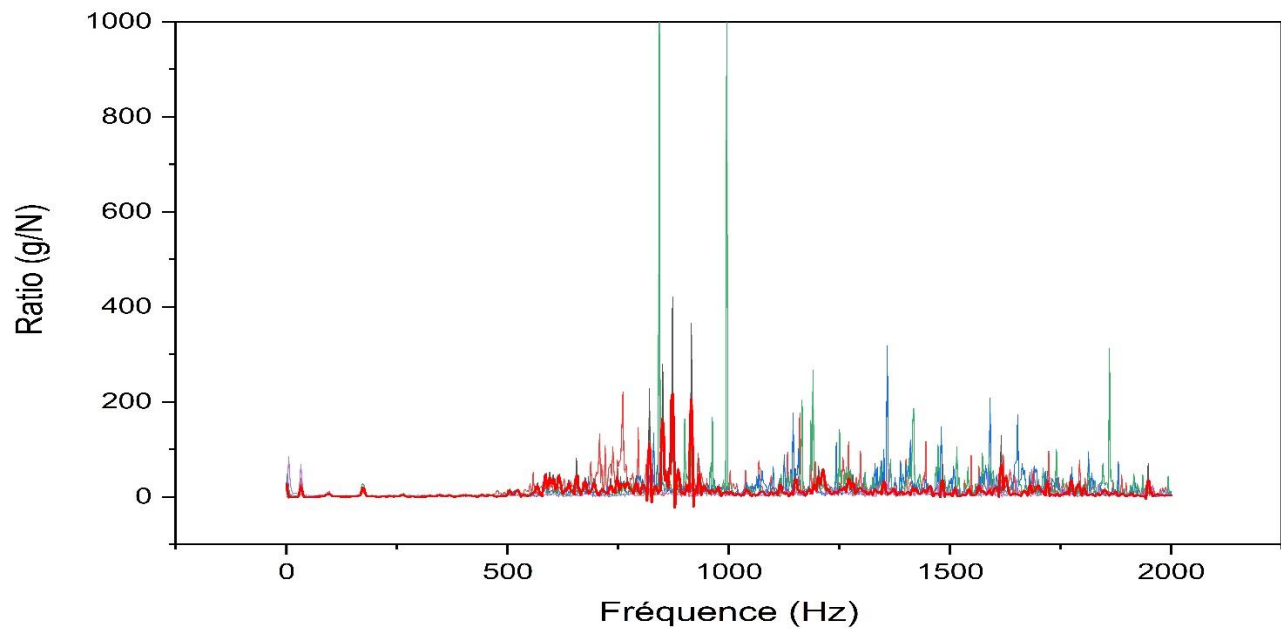


FIGURE 3. 28: La courbe FRF des 28 points après lissage

3.4.10 Les déformés modales

L'étape finale de cette étude consiste à visualiser les déformées modales de la structure étudiée correspondantes aux fréquences propres déterminées à l'aide de l'outil de simulation de logiciel CATSModal

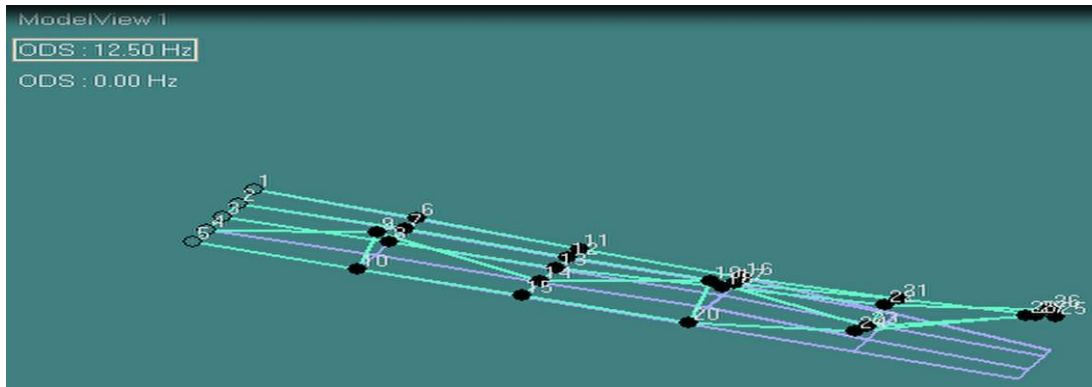


FIGURE 3. 29: Mode 1 (12.50Hz)

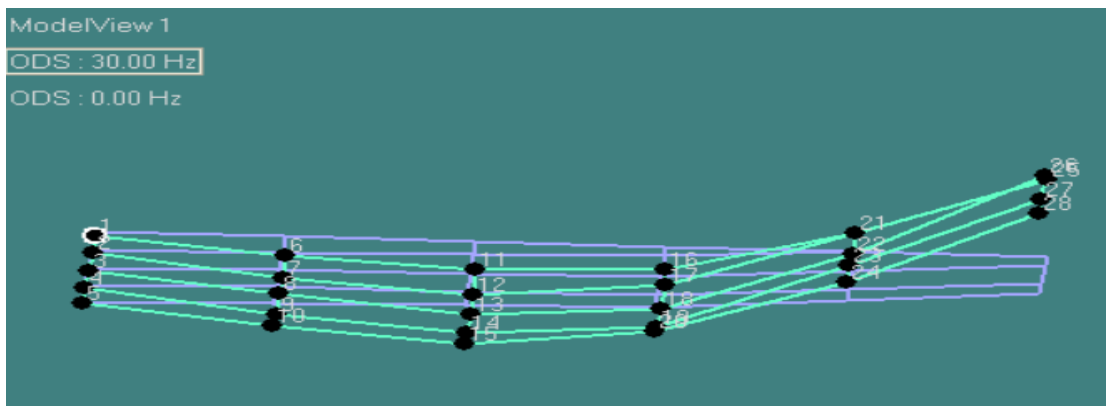


FIGURE 3. 30: Mode 2 (30 Hz)

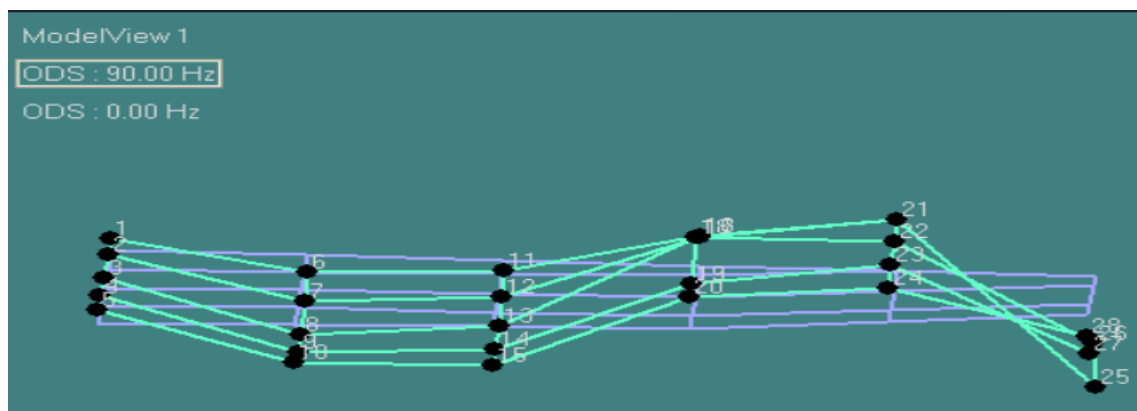


FIGURE 3. 31: Mode 3 (90Hz)

D'après la comparaison de la forme des déformées modales obtenues par CATSMODAL avec la théorie, nous constatons que le nombre des nœuds fixes sont les mêmes pour chaque mode, ce qui signifie que les fréquences déterminées sont correctes.

Chaque fréquence propre est associée à un mode propre, ce qui peut être visualisé à l'aide du programme CATSMODAL.

3.5 Analyse modale numérique (simulation numérique)

La simulation est une méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène ou un système réel par un modèle plus simple mais ayant un comportement analogue. Cette approche permet de mieux comprendre le comportement dynamique de structures complexes sans passer systématiquement par des essais coûteux.

3.5.1 Choix du logiciel de simulation

Parmi les nombreux codes éléments finis disponibles généralistes, spécifiques ou dédiés à des corps de métier. ABAQUS se distingue comme l'un des plus performants et appropriés pour l'analyse vibratoire. Le choix du code de calcul est déterminant dans la réussite d'une modélisation d'analyse modale : il influence notamment le choix du solveur, le type d'éléments utilisés, le schéma d'intégration, ainsi que la possibilité de modéliser la structure en 2D ou 3D.

ABAQUS est particulièrement adapté à notre étude, car :

- Il offre un environnement à la fois paramétrable, ergonomique et complet.
- Il met à disposition une documentation riche, un large éventail de types d'éléments finis, et des modèles de comportement avancés.
- Il est l'un des rares codes à permettre une gestion fine de la cinématique des corps solides, ce qui est essentiel pour capturer fidèlement les modes propres d'une structure légère et flexible telle qu'une demi-aile de drone.

Pour toutes ces raisons, la simulation numérique de l'analyse modale de la demi-aile de drone a été réalisée avec ABAQUS.

3.5.2 Implémentation d'un modèle numérique

Pour la simulation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis, plusieurs facteurs de modélisation peuvent directement être associés à la qualité des résultats numériques obtenus, tels que le type d'élément employé pour la discrétisation de la pièce ou le schéma de résolution, etc. L'étude bibliographique a fait ressortir les paramètres prépondérants sur la simulation en fréquence :

Type d'élément, Description du comportement mécanique de l'ensemble,
Modélisation des conditions aux limites.

3.5.3 Le maillage

Le maillage constitue une étape cruciale dans toute simulation par la méthode des éléments finis. Il conditionne non seulement la précision des résultats, mais également la stabilité numérique et le coût computationnel de l'analyse. En analyse fréquentielle, le choix du maillage doit répondre à des exigences spécifiques liées à la représentation des modes propres et à la fidélité de la distribution des champs vibratoires.

Plusieurs critères gouvernent le choix d'un maillage adapté :

- Taille des éléments.
- Type d'élément.
- Qualité du maillage.
- Raffinement localisé.

Dans notre cas nous avons une géométrie complexe de la demi-aile, pour cela on a choisi le maillage non structuré (tétraèdres en 3D, 12051995 éléments).

3.5.4 Comportement mécanique du matériau composite

Nous étudions le comportement mécanique du composite à base de fibres de verre de type E et de résine époxy, un matériau largement utilisé pour ses excellentes propriétés de résistance mécanique, de légèreté et de durabilité.

TABLEAU 3. 3: Propriétés fibre de verre résine époxy type E

Densité (Kg.m ⁻³)	Coefficient de poisson	Module d'élasticité (MPa)		Module de cisaillement (MPa)		
		E_1	E_2	G_{12}	G_{13}	G_{23}
26000	ν_{12}	E_1	E_2	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	0.25	24000	24000	42000	42000	4200

E_1 : module d'élasticité longitudinal.

E_2 : module d'élasticité transversal.

ν_{12} : déformation transversal résultante lorsque le matériau subit une déformation longitudinale.

G_{12}, G_{13}, G_{23} : les coefficients de rigidité associés aux déformations de cisaillements.

3.5.5 Mise en données du problème

Cette étape consiste à définir précisément les paramètres géométriques, matériaux, conditions aux limites et sollicitations de la demi-aile sur logiciel selon les étapes suivantes :

- **Module part** : obtention de la géométrie de l'aile depuis SOLIDWORK

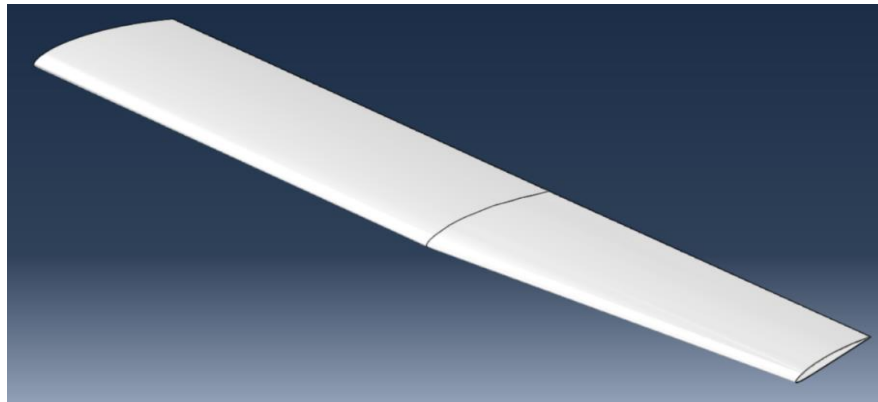


FIGURE 3. 32: Géométrie de la demi aile

- **Module property** : pour la définition des propriétés cliquez sur
 - Create material.
 - General puis Density.
 - Entrez 2.6 E-09 sur la ligne Mass density.
 - Mechanical sélectionnez Elasticity
 - Entrez les modules d'élasticité et de cisaillement + coefficient de poisson.
- **Create section** : modalisation de la couche de fibre de verre.

Name section-1, Category shell puis Type composite.
- **Create step** : pour l'étude fréquentielle
 - Dans le champ « Name », saisir « FirstStep ».
 - Procedure type, linear perturbation puis frequency
- **Fréquence maximale considérée**
 - Etablir la fréquence maximale à 200 (Cycle/Time)

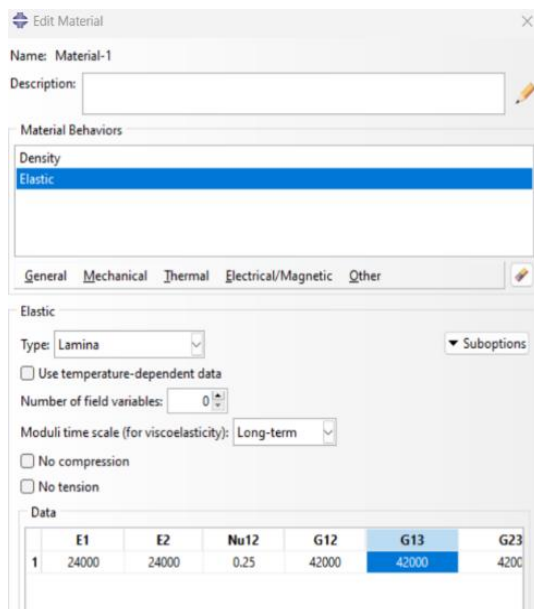


FIGURE 3. 33: Définition propriétés fibre de verre

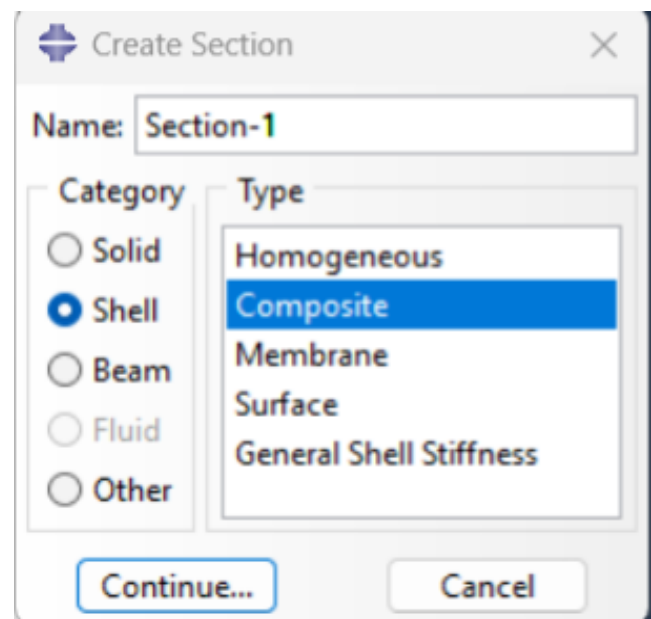


FIGURE 3. 34: Création des sections

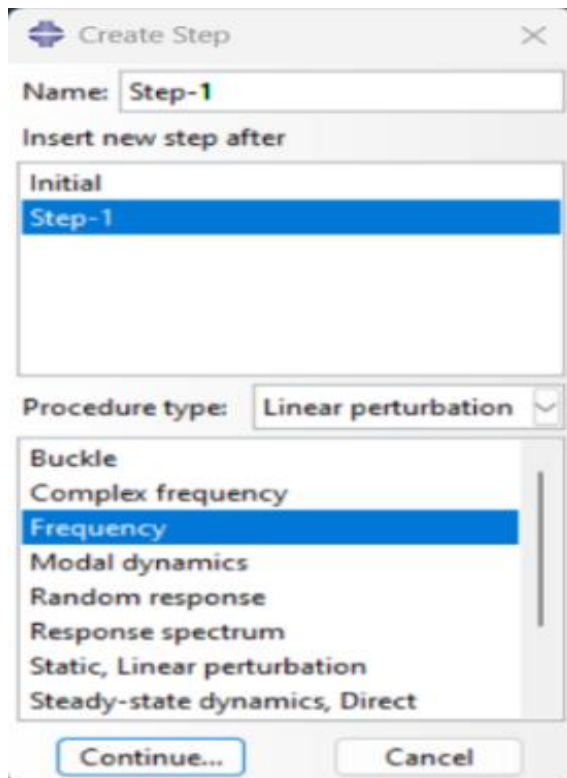


FIGURE 3. 35: Création de l'étape d'étude fréquentielle

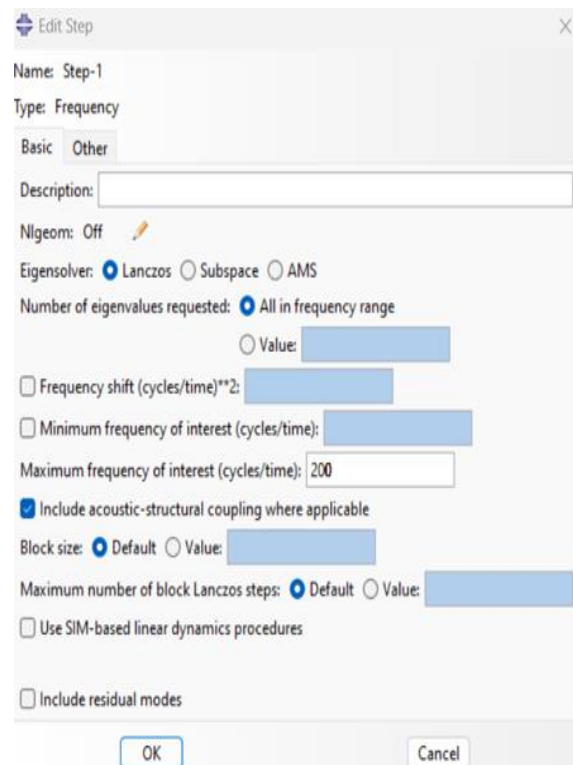


FIGURE 3. 36: Définition de la fréquence maximale

➤ **Module load :** configuration des conditions aux limites

- Cliquer sur « Create Boundary Condition ».
- Dans le champ « Name », saisir « BC-1 ».
- Vérifier que l'item pour la ligne "Step" était positionné sur « initial (Step 1) ».
- Dans la liste « Category », sélectionner « Mechanical »
- Dans la liste "Types for selected step", choisir « Symmetry/Antisymmetry/Encastre ».
- Après avoir cliqué sur "Continue", sélectionner la face du profil pour laquelle nous avons choisi l'encastrement.
- Appuyer sur « Done », choisir « Encastre » puis « OK ».

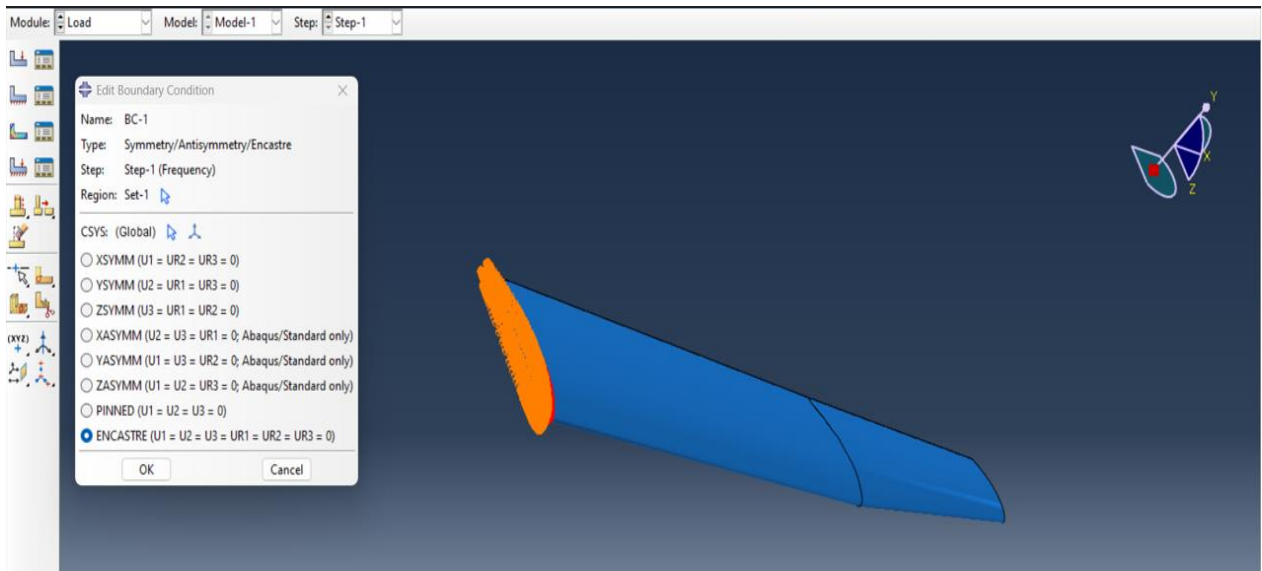


FIGURE 3. 37: Choix de la face d'encastrement

➤ **Module Mesh** : suivant une approche méthodique

- Ajustement des paramètres de contrôle (densité, qualité de maillage).
- « Mapped Meshing » pour un maillage régulier et précis, adapté aux géométries complexes puis maillage libre pour la flexibilité.

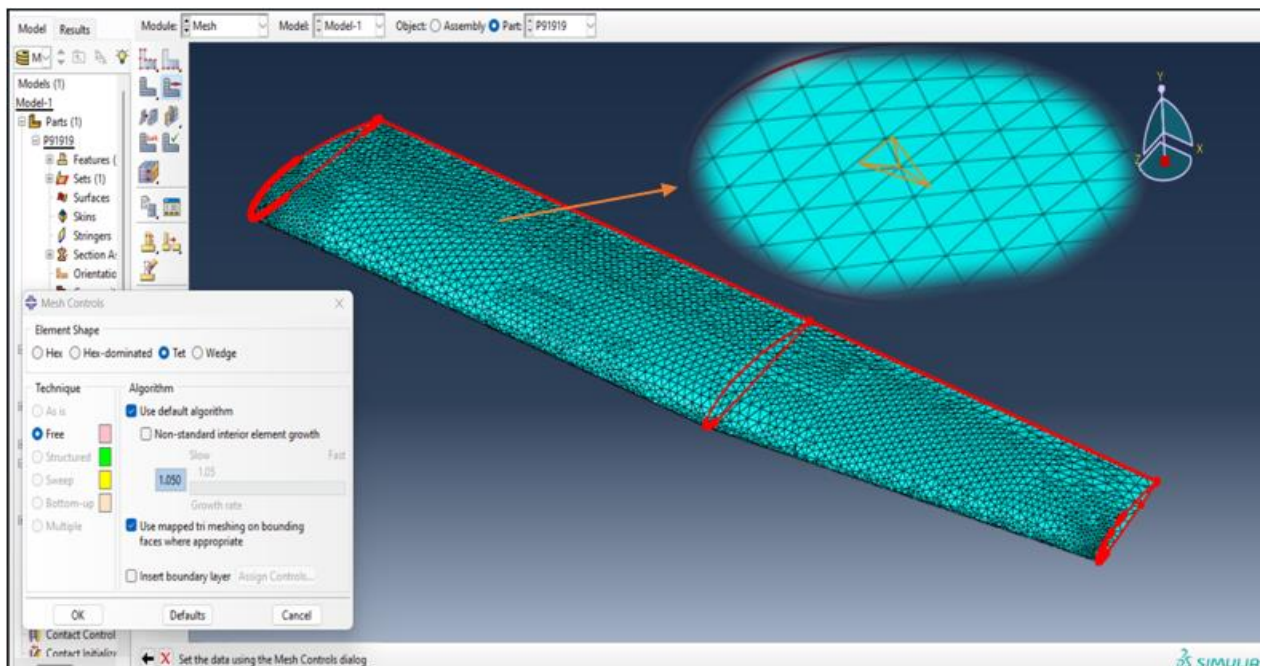


FIGURE 3. 38: Maillage du modèle adopté

- **Module job** : pour lancer la simulation
 - Appuyer sur « crée job ».
 - Dans le champ « Name », saisir « job-1 », « Continue » puis « ok ».
 - « Job Manager » puis « Submit » pour soumettre le job créé.

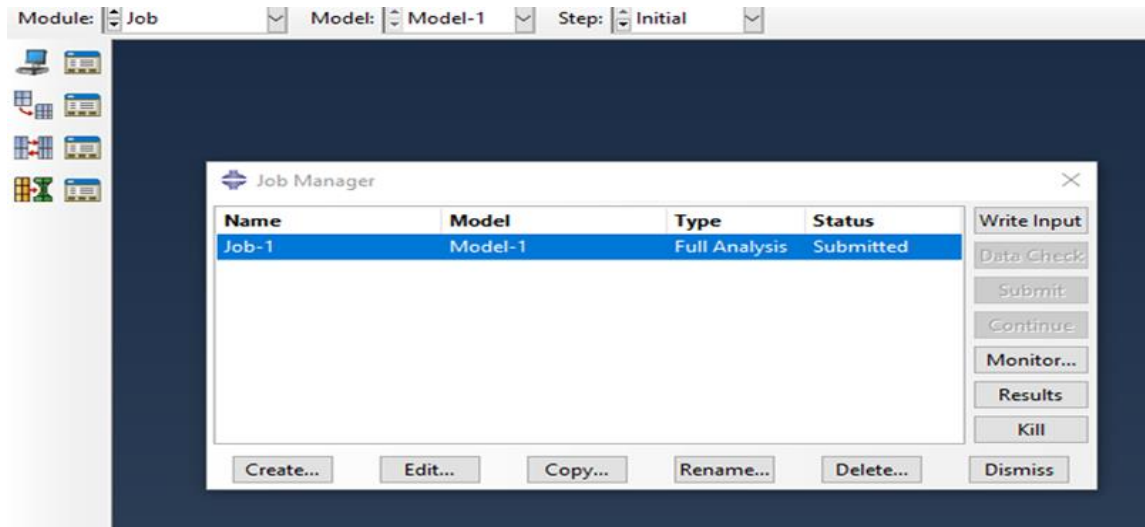


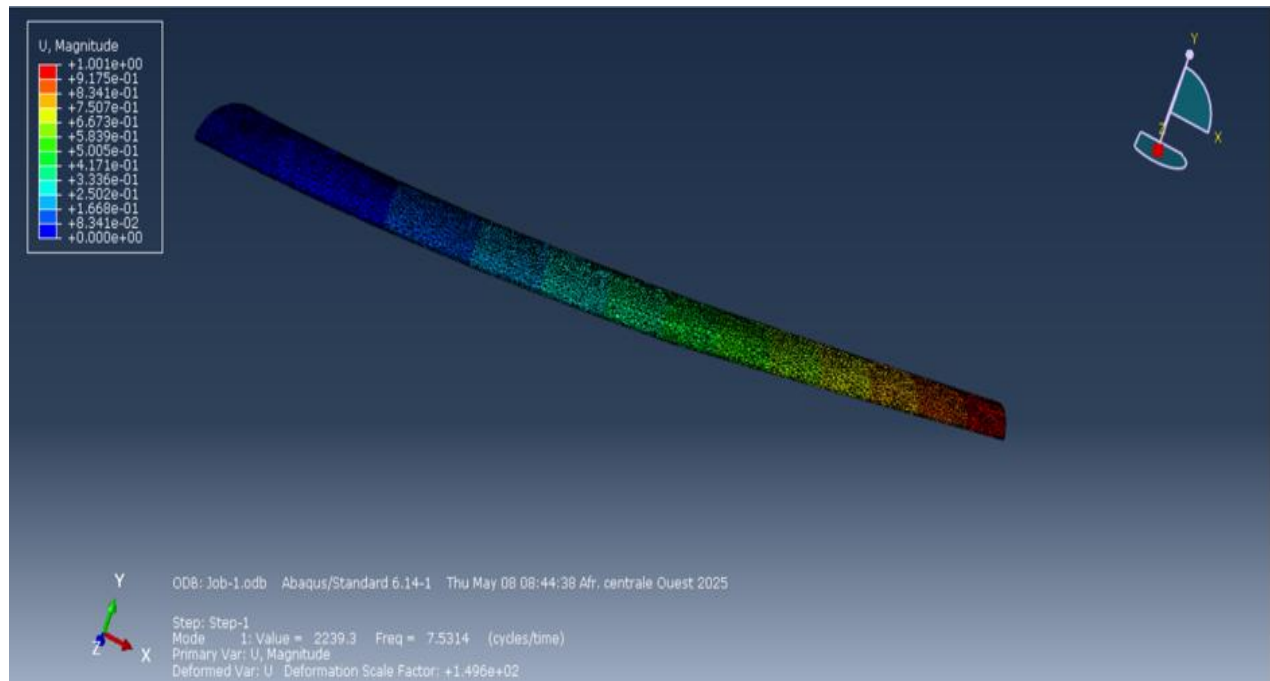
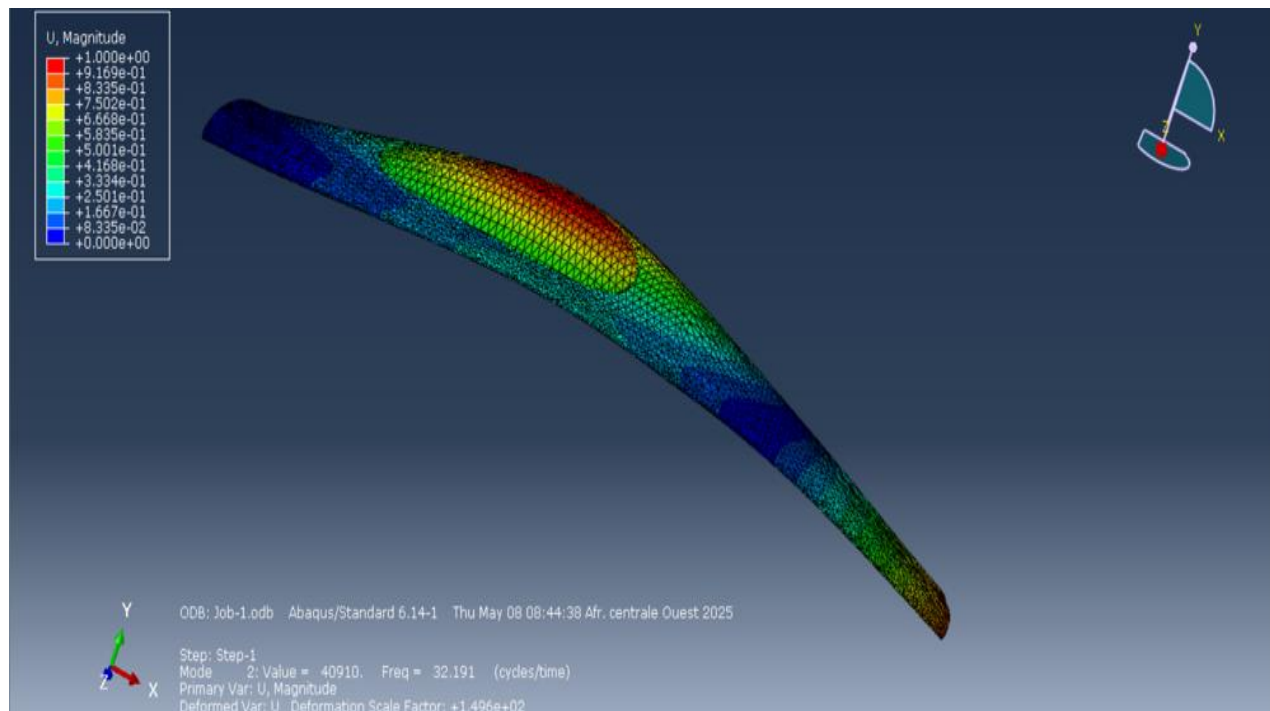
FIGURE 3. 39: Soumettre le calcul

- **Module visualisation** consultation des résultats après la simulation
 - Dans le gestionnaire des tâches appuyer sur « Results ».
 - Cliquer sur l'outil spécifique  Abaqus/CAE affiche la déformation du modèle.

1. Résultats de la simulation

L'allure des trois modes est présentée sur les figures suivantes, illustrant les formes modales associées aux trois premières fréquences propres du système.

- **Mode 1 fréquence = 7.5314 Hz**
- **Mode 2 fréquence = 32.191 Hz**
- **Mode 3 fréquence = 90.823 Hz**

**FIGURE 3. 40: Premier mode de déformation****FIGURE 3. 41: Deuxième mode de déformation**

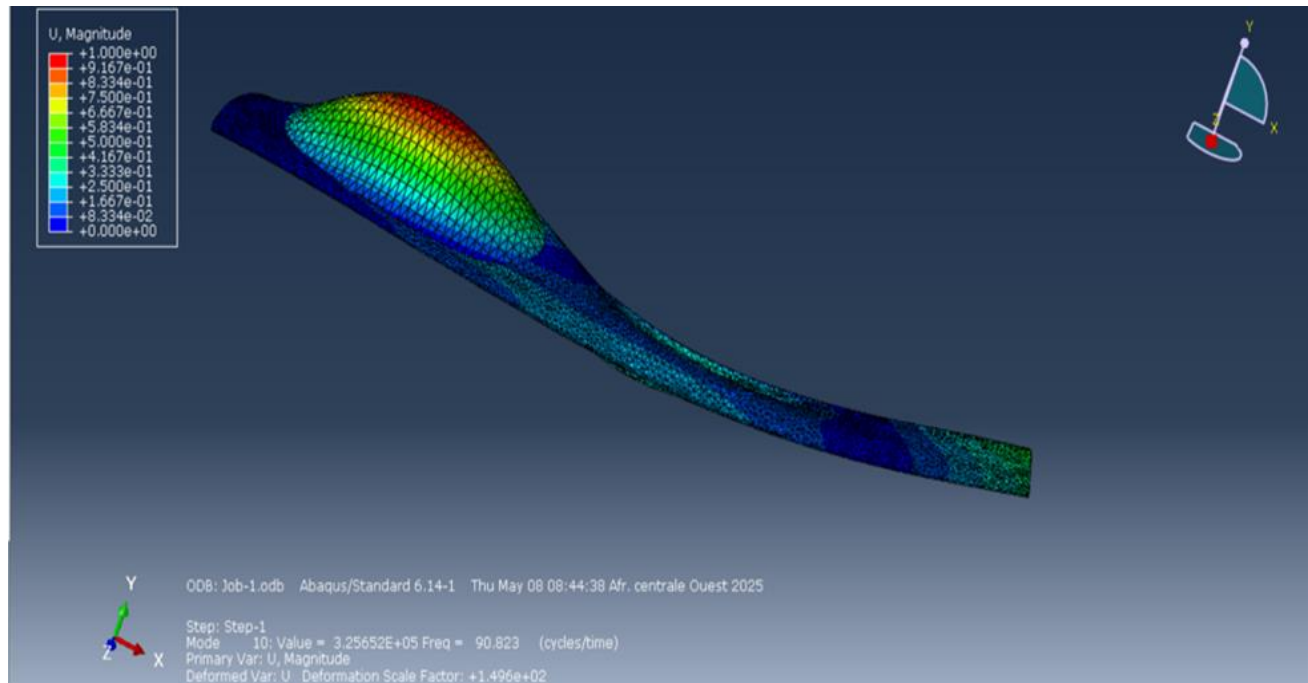


FIGURE 3. 42: Troisième mode de déformation

3.6 Analyse comparative

L'analyse modale permet de caractériser les propriétés dynamiques d'un système (fréquences propres, formes modales), Trois approches principales peuvent être employées :

- Théorique (analytique).
- Expérimentale.
- Numérique (FEM - Méthode des Éléments Finis).

Les fréquences théoriques, expérimentales et numériques sont illustrés dans le tableau suivant:

TABLEAU 3. 4 : Comparaison des résultats des fréquences propres

Les fréquences	Théorique (Hz)	Simulation (Hz)	Expérimentale (Hz)
1	14.971	7.5314	12.50
2	-	32.191	30
3	-	90.823	90

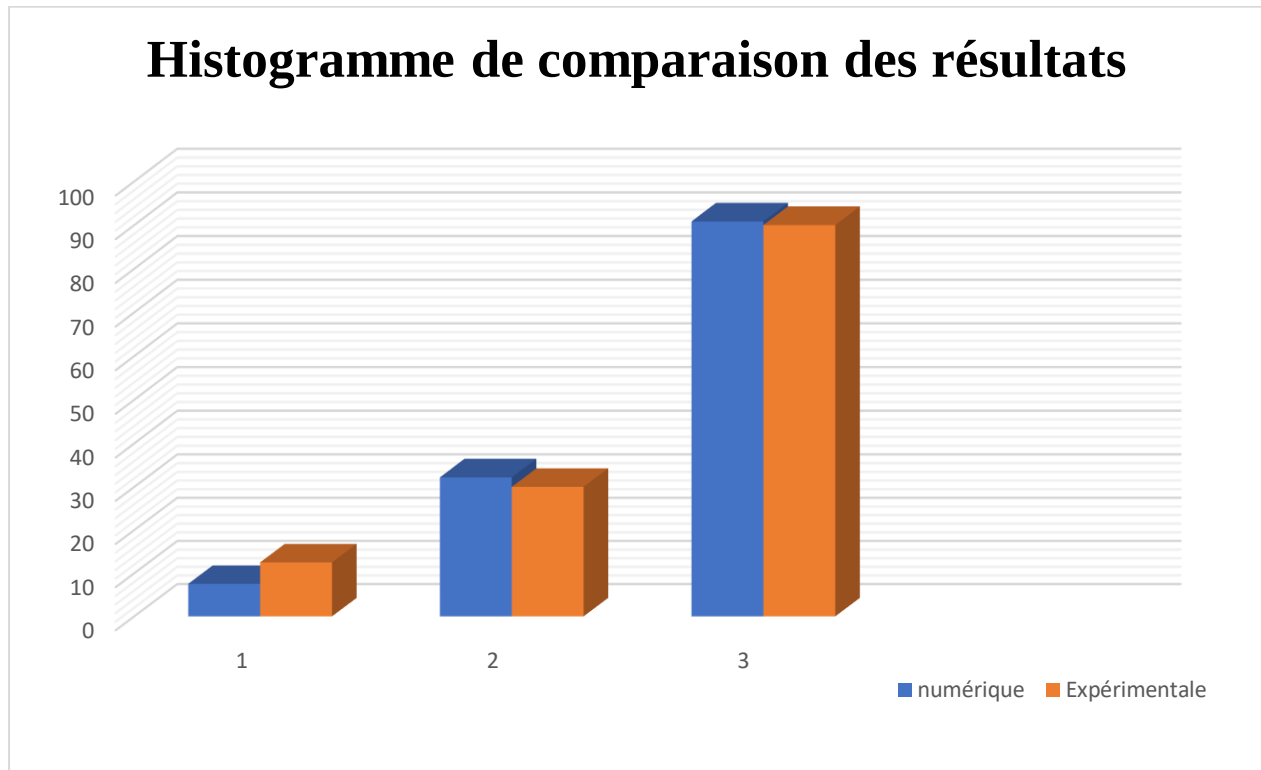


FIGURE 3. 43 : Comparison des résultats numériques et expérimentaux

3.7 Validation expérimentale des résultats sur la demi-aile

Après avoir effectué une analyse modale théorique, numérique (par éléments finis) et expérimentale sur la structure de la demi-aile du drone, une étape de validation réelle a été entreprise afin de confirmer la cohérence des résultats obtenus. Cette validation s'inscrit dans une démarche expérimentale visant à reproduire les conditions vibratoires réelles auxquelles la structure pourrait être soumise.

3.7.1 Objectif

L'objectif principal de cette étape est de soumettre la demi-aile à des excitations vibratoires correspondant aux fréquences propres identifiées lors de l'analyse modale expérimentale. Cela permet de visualiser et de valider les modes propres de vibration réels de la structure.

3.7.2 Matériel utilisé

- **Pot vibrant (shaker)** : Dispositif permettant de générer des vibrations à des fréquences précises.



FIGURE 3. 44: Pot vibrant

- **Générateur de signal** : Pour piloter le pot vibrant et définir les fréquences d'excitation.
- **Amplificateur de puissance** : Pour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du pot vibrant.
- **Accéléromètre** : Pour mesurer la réponse vibratoire de la structure.
- **Tige en silicone** : Élément de liaison souple entre le pot vibrant et la demi aile, permettant une transmission efficace des vibrations sans rigidifier excessivement le montage.
- **Banc de fixation rigide** : Pour maintenir la demi-aile avec des conditions aux limites proches de celles des simulations.
- **Poudre légère** : Utilisée pour visualiser les formes modales.
- **Caméra / appareil photo** : Pour enregistrer les réponses vibratoires.

3.7.3 Préparation de l'essai

- La demi aile a été installée sur un banc d'essai rigide reproduisant un encastrement fixe à l'emplanture.

- Le pot vibrant a été relié à la structure à l'aide d'une tige en silicone, agissant comme un accouplement flexible. Ce type de liaison permet de transmettre les vibrations efficacement tout en évitant les distorsions liées à une connexion trop rigide, garantissant ainsi une réponse structurelle plus naturelle.
- Répartition uniforme d'une fine couche de poudre légère sur la surface de la demi aile.



FIGURE 3. 45: Application de la poudre légère sur la demi aile

3.7.4 Excitation de la structure

- Le générateur de signal pilote le pot vibrant via l'amplificateur.
- Les fréquences propres identifiées expérimentalement sont appliquées une à une à la structure.
- À chaque fréquence, la demi aile entre en résonance et réagit selon sa forme modale correspondante.

3.7.5 Visualisation des formes modales

- Sous excitation, la poudre se déplace dans les zones de forte amplitude vibratoire, tandis qu'elle reste en place au niveau des nœuds modaux (zones de déplacement nul ou très faible).
- Ce phénomène permet de visualiser clairement les lignes nodales sur la surface de la demi aile.

3.7.6 Enregistrement et analyse des données

- Photographies prises après chaque excitation, montrant la répartition finale de la poudre sur la surface.
- Vidéos enregistrées pendant la vibration, permettant d'observer en temps réel le déplacement de la poudre et la dynamique de la structure.

Cette méthode, bien que qualitative, s'est révélée très illustrative et complémentaire aux approches numériques et expérimentales classiques, en fournissant une validation visuelle directe des modes de vibration de la demi aile.

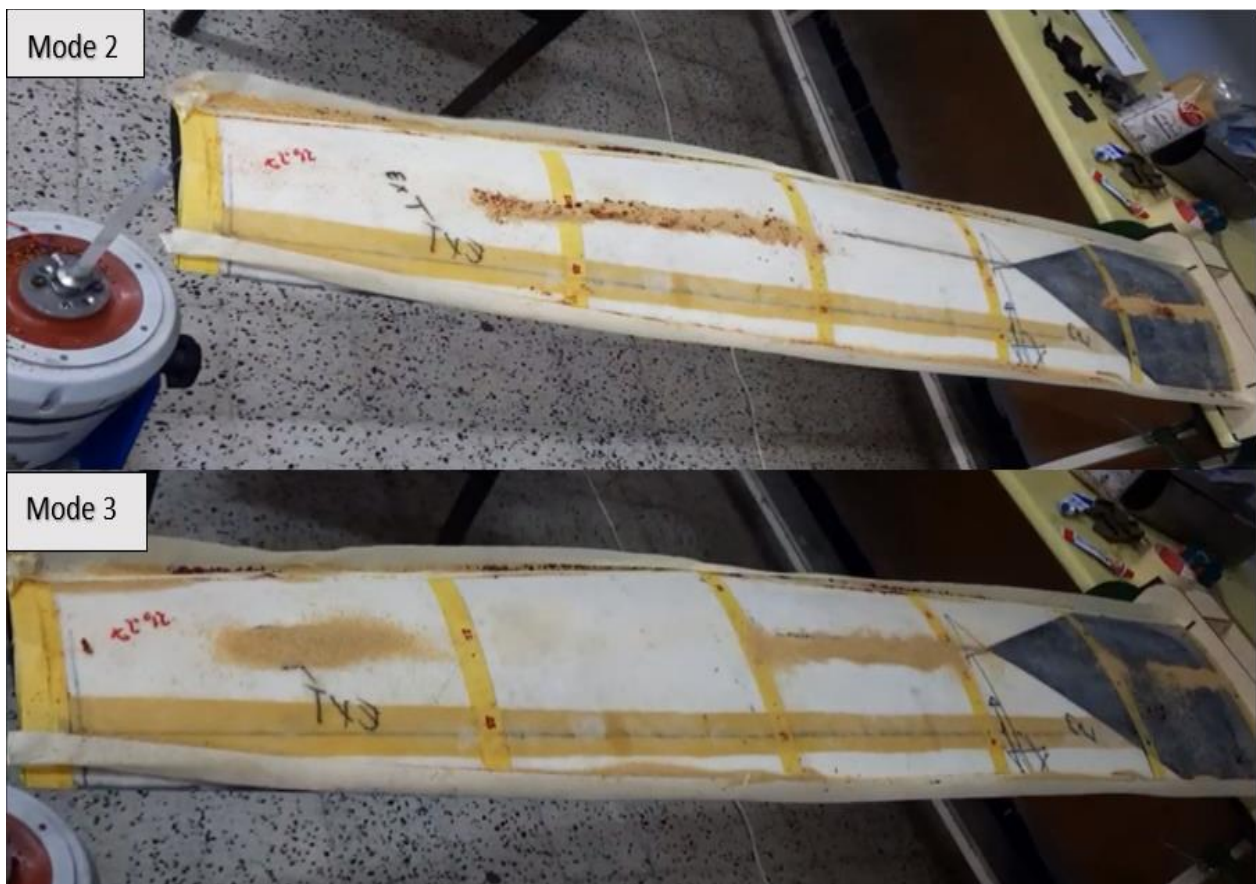


FIGURE 3. 46: Validation visuelle des différents modes

1. Principe de la caméra rapide

Une caméra rapide est capable de capturer un grand nombre d'images par seconde (jusqu'à plusieurs milliers de FPS), ce qui permet d'observer des phénomènes rapides (comme des vibrations, des chocs, ou des déformations dynamiques) avec une grande précision temporelle.

Contrairement aux caméras classiques (30 ou 60 FPS), la caméra rapide « ralentit » visuellement le mouvement quand on rejoue la vidéo, ce qui permet d'analyser précisément la réponse dynamique d'un objet en vibration.

3.8 Conclusion

L'analyse théorique du premier mode de vibration de la demi-aile, assimilée à une poutre encastrée-libre, a fourni une estimation initiale des caractéristiques dynamiques. Cette approche a été complétée par une étude expérimentale et une simulation numérique, puis validée par des essais réels. L'ensemble de ces méthodes a permis de caractériser de façon fiable le comportement vibratoire de la demi-aile.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce Projet de Fin d'Études a porté sur la rétro-ingénierie, la modélisation, la fabrication partielle et l'analyse vibratoire d'un mini-drone à voilure fixe, avec un focus particulier sur la demi-aile. Ce travail nous a permis de mobiliser les compétences théoriques et pratiques acquises tout au long de notre formation en construction mécanique et en théorie des structures, dans un contexte réel et appliqué à l'ingénierie aéronautique.

Tout au long de ce projet, nous avons veillé à maintenir une cohérence forte entre les différentes étapes, depuis l'étude théorique jusqu'à la validation expérimentale et numérique. Chaque phase a été pensée pour s'articuler avec les autres, contribuant à la réussite globale du travail.

Dans un premier temps, nous avons approfondi les fondamentaux des drones à voilure fixe, en analysant leur évolution, leur classification et leurs particularités structurelles. Cette étape nous a permis d'asseoir une base solide sur laquelle construire la suite du projet, tout en comprenant les enjeux liés à la portance, la stabilité et les performances aérodynamiques.

La deuxième phase du projet a été consacrée à la rétroconception complète du drone. Grâce à un scan 3D de précision et à l'utilisation du logiciel SolidWorks, nous avons pu numériser et modéliser l'ensemble des composants du drone, notamment le fuselage, la poutre, l'empennage et les ailes. Toutefois, la réalisation physique n'a concerné que la demi aile, fabriquée en matériaux composites (carbone, verre, kevlar) pour répondre aux exigences de rigidité et de légèreté. Cette étape nous a permis d'appliquer concrètement des méthodes de conception avancées, de prototypage et de fabrication assistée.

Enfin, la troisième partie du travail s'est concentrée sur l'analyse modale de la demi aile, une étape essentielle pour la compréhension du comportement vibratoire de la structure. Nous avons mis en œuvre une approche complète combinant une modélisation théorique, une analyse expérimentale par impact et mesure d'accélération, et une simulation numérique par éléments finis sous ABAQUS. Les résultats obtenus, comparés et analysés, ont confirmé la validité de notre démarche et permis d'identifier les modes propres critiques à surveiller.

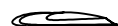
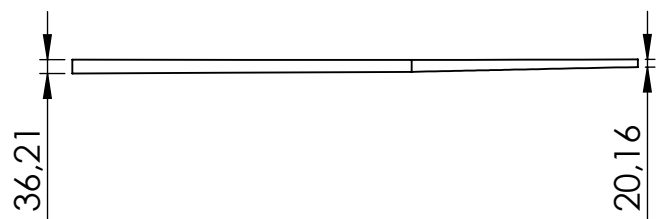
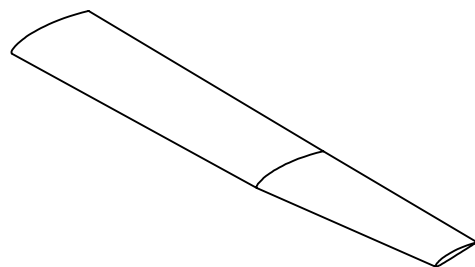
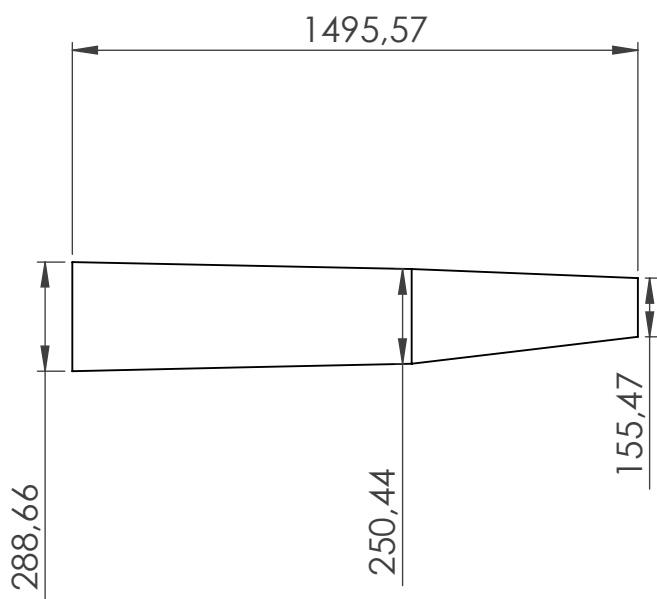
Ce projet nous a permis non seulement de confronter nos connaissances à une problématique technique réelle, mais aussi de développer une méthodologie rigoureuse et polyvalente, applicable à d'autres systèmes mécaniques et aéronautiques. Il démontre notre capacité à mener un projet de conception et d'analyse de bout en bout, en intégrant la modélisation, la fabrication et la validation.

Conclusion générale

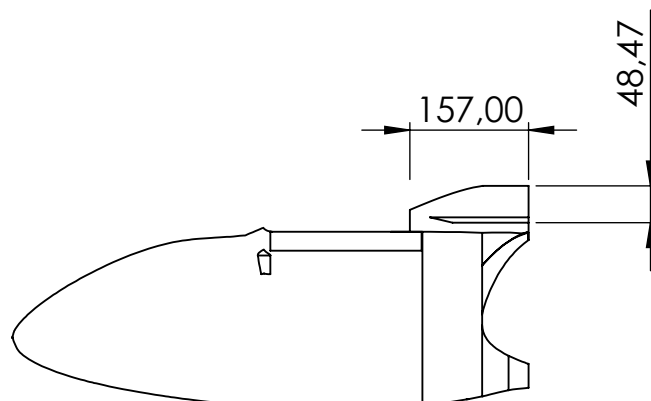
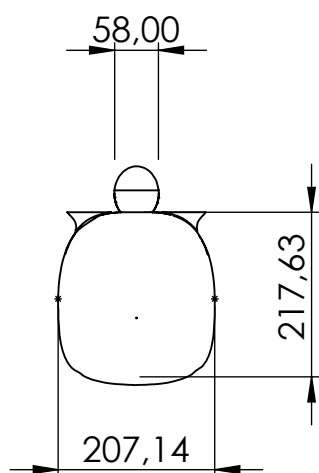
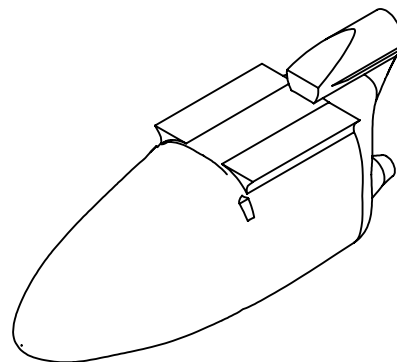
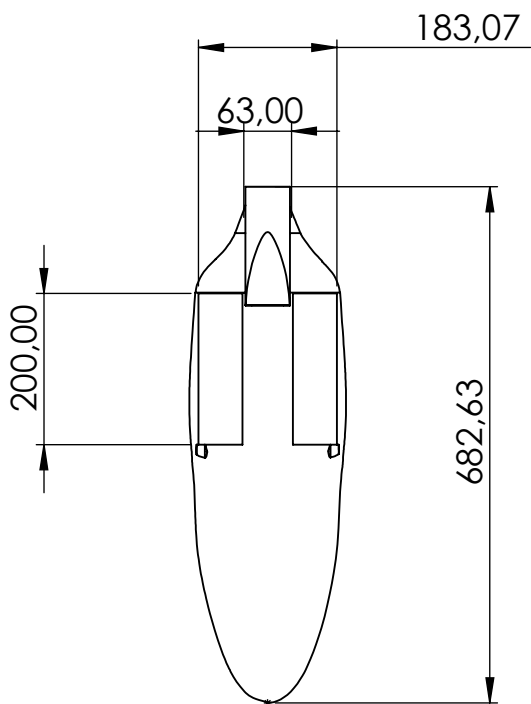
Nous sommes convaincus que ce travail ouvre des perspectives concrètes pour des projets futurs, notamment dans le développement de drones plus performants, l'intégration de capteurs intelligents pour la surveillance structurelle, ou encore l'optimisation topologique par simulation numérique. Il pourrait également servir de base à des applications stratégiques telles que la cartographie, la surveillance environnementale, ou encore l'inspection d'infrastructures.

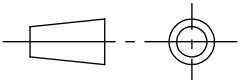
En conclusion, ce PFE constitue une étape marquante dans notre parcours académique et professionnel. Il a renforcé notre autonomie, notre esprit d'analyse et notre sens de l'innovation. Nous espérons qu'il inspirera d'autres étudiants à explorer ce domaine prometteur, où les technologies de pointe rencontrent les besoins concrets du terrain.

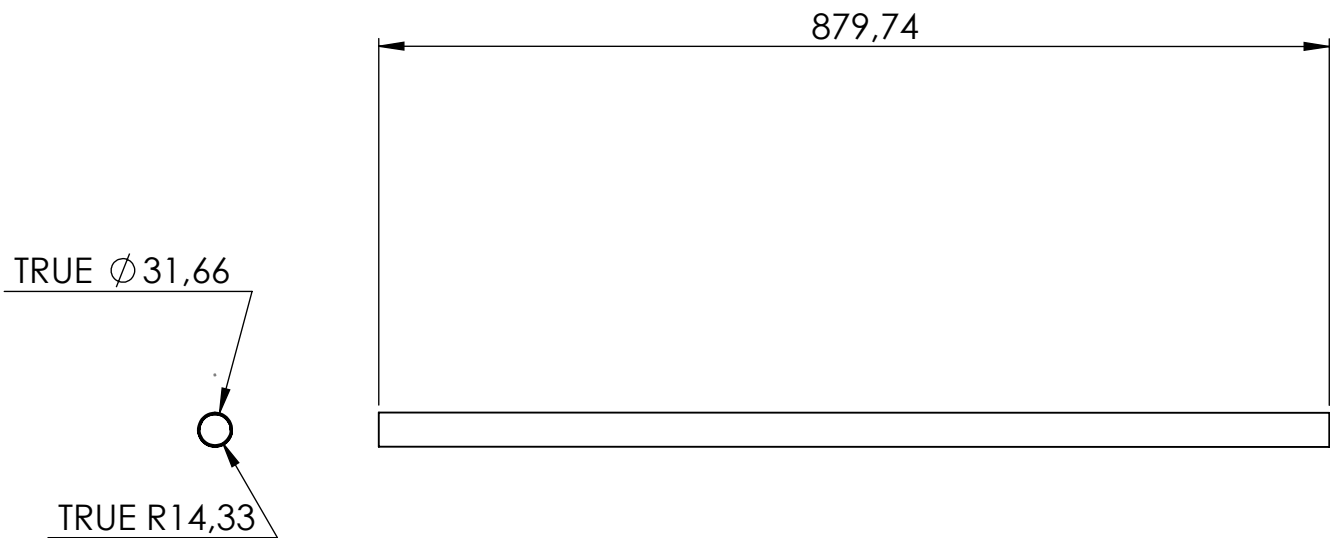
ANNEX

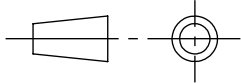


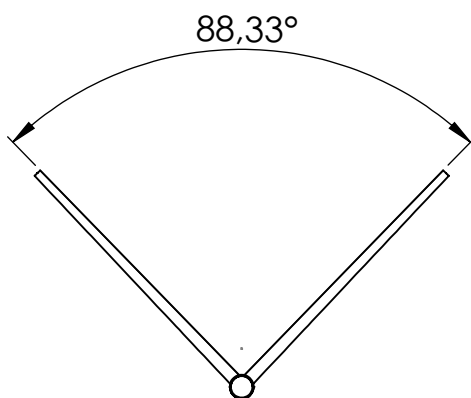
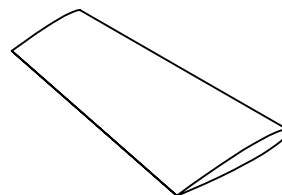
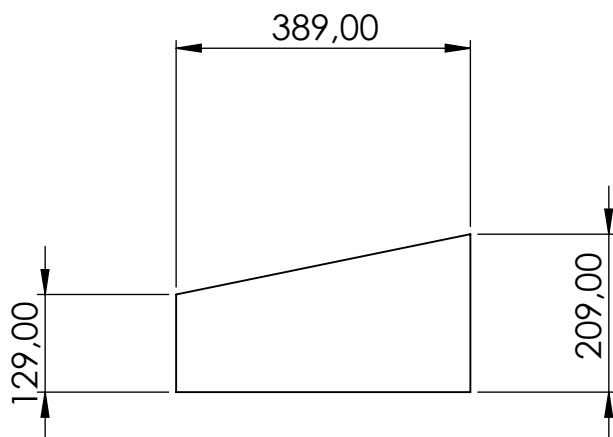
Échelle 1:20	Matière: Composite	Conception d'un Drone à Voilure Fixe	Dessin par: Mahamoud adel Bekhit yousra
	Demi Aile		10/04/2025
Format: A4			USDB

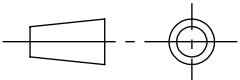


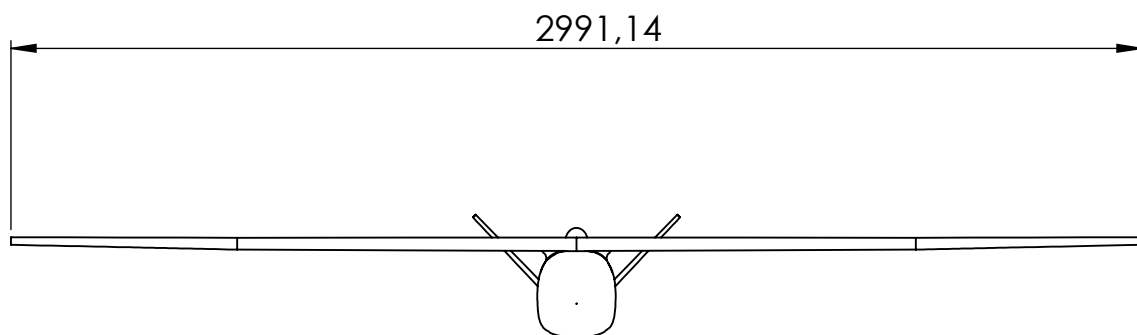
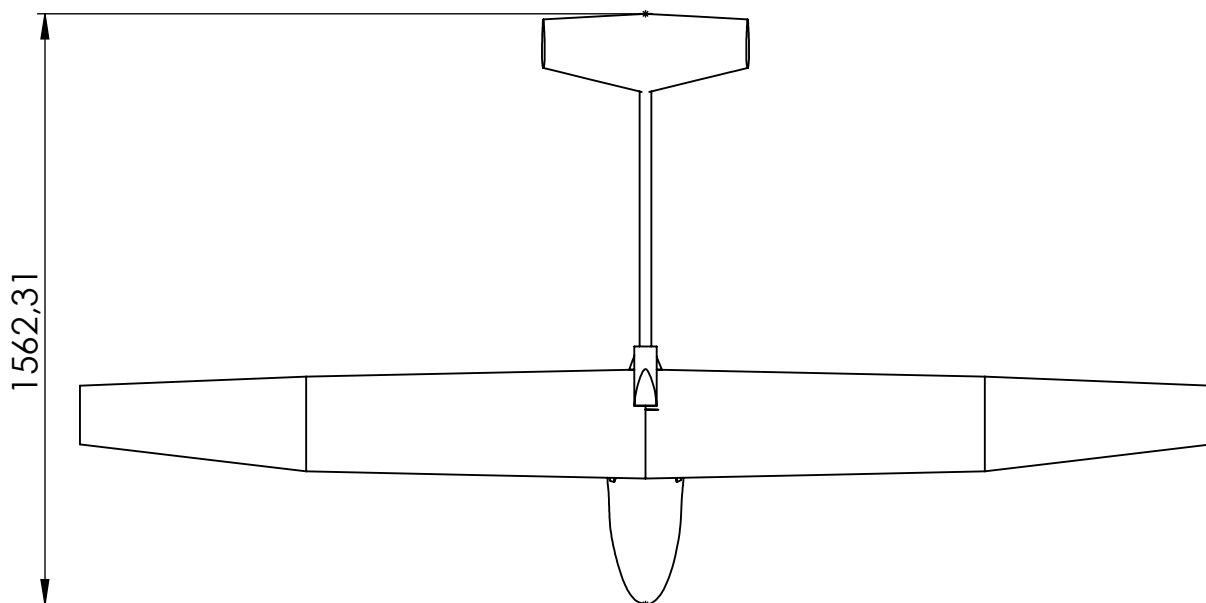
Échelle 1:10	Matière: Composite	Conception d'un Drone à Voilure Fixe	Dessin par: Mahamoud adel Bekhit yousra
	Fuselage		10/04/2025
Format: A4			USDB

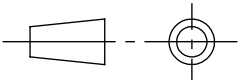


Échelle 1:7	Matière: Composite	Conception d'un Drone à Voilure Fixe	Dessin par: Mahamoud adel Bekhit yousra
	Poutre		10/04/2025
Format: A4			USDB



Échelle 1:10	Matière: Composite	Conception d'un Drone à Voilure Fixe	Dessin par: Mahamoud adel Bekhit yousra
	L'empennage		10/04/2025
Format: A4			USDB



Échelle 1:20	Matière: Composite	Conception d'un Drone à Voilure Fixe	Dessin par: Mahamoud adel Bekhit yousra
	Drone à Voilure Fixe		10/04/2025
Format: A4			USDB

Annexe

Le tableau suivant donne les caractéristiques de plis fibres + résine époxyde à 50% de fibre en volume [1]

	Verre	Kevlar	Carbone
Teneur en volume de renfort $V_f(\%)$	50%	50%	45%
Masse volumique $[\text{kg. m}^{-3}]$	1900	1330	1450
Contrainte de rupture en traction suivant x ou y (Mpa)	400	500	420
Contrainte de rupture en compression suivant x ou y (Mpa)	390	170	360
Contrainte de rupture en cisaillement dans le plan x et y (Mpa)	55	150	55
Module d'élasticité EX (=EY) (Mpa)	24000	22000	54000
Module de cisaillement GXY (Mpa)	4200		4000
Coefficient de poisson	0.25		0.045

La teneur en volume de renfort

On appelle ainsi le rapport

$$V_f = \frac{\text{volume de teneur}}{\text{volume de renfort}}$$

Le tableau suivant donne les caractéristiques mécaniques de la résine époxyde

Caractéristique	Valeurs
Masse volumique $[\text{kg. m}^{-3}]$	1200
Module d'élasticité (Mpa)	45000
Module de cisaillement (Mpa)	1600
Coefficient de poisson	0.4
Contrainte de rupture en traction (Mpa)	130
Allongement à la rupture	2 (100 °C) à 6 (200 °C)
Temperature limite d'utilisation	90 à 200

Annexe

Caractéristiques des vibrations [2]

- **Fréquence**

La fréquence f est le nombre de fois qu'un phénomène se répète pendant un temps donné. Lorsque la seconde est choisie comme unité de temps, la fréquence s'exprime en Hz :

$$1\text{Hz} = \frac{1 \text{ cycle}}{1 \text{ seconde}}$$

La fréquence f est l'inverse de la période T : $f = \frac{1}{T}$

$$1\text{Hertz} = \frac{1 \text{ CPM}}{60} = \frac{1\text{RPM}}{60} \text{ et } f = \frac{N}{60}$$

Avec N la vitesse de rotation exprimée en tours par minute.

- **Amplitude**

Ω l'amplitude d'une vibration est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre.

- **Phase**

Déphasage entre deux signaux harmoniques correspond à un angle appelé angle de phase, noté θ , tel que $\theta = \Omega \cdot \Delta t$

Les grandeurs de mesure d'une vibration

- **Le déplacement**

Cette grandeur a pour dimension L et son unité de mesure est le **mètre (m)**.

$$x(t) = \sin(\omega t + \varphi)$$

- **La vitesse**

Sa dimension est une longueur divisée par le temps (L/T) et elle s'exprime en **mètre par seconde (m/s)**.

$$V(t) = \frac{dX(t)}{dt} = X_m \omega \cos(\omega t + \varphi)$$

- **L'accélération**

Sa dimension est une longueur divisée par le carré du temps (L/T^2).

Elle s'exprime en (**m/s²**)

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt} = -X(t)\omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$$

Calcul analytique de fréquences propres d'une géométrie simple

Flexion latérale des poutres (Modèle d'Euler-Bernoulli)

On étudie le comportement dynamique des poutres élancées en utilisant le modèle d'Euler-Bernoulli. Lorsque l'élancement, rapport *longueur de la poutre* sur *épaisseur de la poutre* (L/h), est grand, la déformation de la poutre due au cisaillement est généralement négligeable devant celle due à la flexion pure. On considère alors que les sections droites restent orthogonales à la fibre neutre

L'équation du mouvement, initialement proposée par Lord Rayleigh, s'écrit sous la forme suivante :

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\rho I^2}{A} \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

En négligeant l'inertie rotatoire des sections droites (poutres élancée), l'équation du mouvement devient :

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

Cette dernière équation est l'équation de base des vibrations latérales des poutres. La solution de cette équation (pour EI égale une constante) est donnée par [58]:

$$v(x,t) = X(x) [\cos(\omega_n t + \theta)]$$

On introduit le paramètre fréquentiel adimensionnel défini par :

$$\beta^4 = \frac{\omega_n^2 \rho A L^4}{EI}$$

Ce qui donne [58] :

$$\frac{d^4 X}{dx^4} = \beta^4 X$$

La solution de l'équation différentielle précédente donne la déformée modale de la poutre $X(x)$, sous la forme suivante :

$$X(x) = A_1 \sin(\beta \frac{x}{L}) + A_2 \cos(\beta \frac{x}{L}) + A_3 \sinh(\beta \frac{x}{L}) + A_4 \cosh(\beta \frac{x}{L})$$

où A_1 , A_2 , A_3 , et A_4 sont des constantes d'intégration déterminées grâce aux conditions limites.

Annexe

Les fréquences propres de la poutre s'écrivent alors :

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

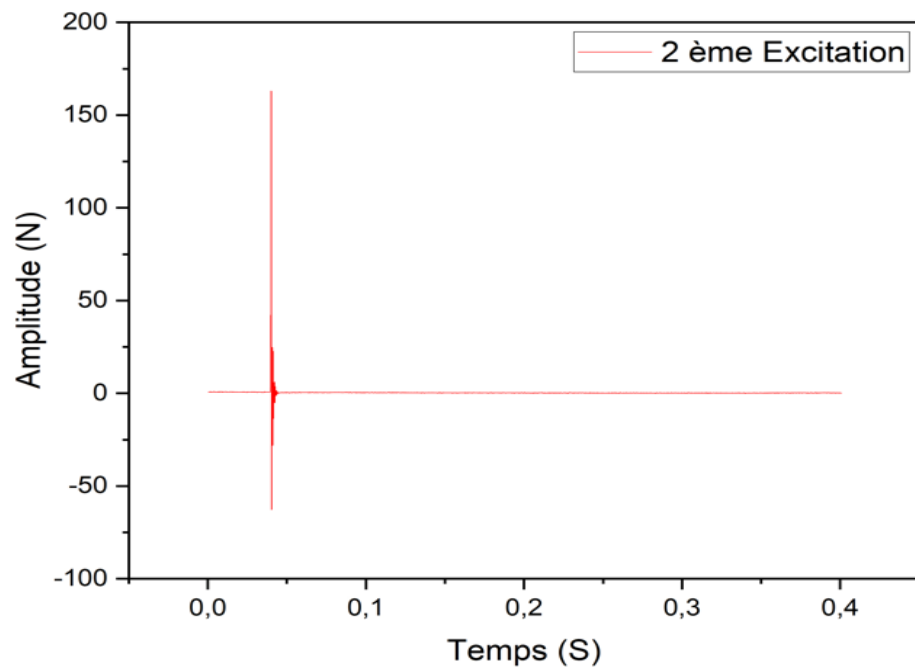
β_n est un paramètre fréquentiel adimensionnel déterminé pour la *nième* fréquence propre. Il dépend des conditions aux limites de la poutre.

Conditions aux limites	β_1	β_2	β_3	... β_n
Encastrée-Libre	1.8751	4.7124	7,85	$(2n-1)\frac{\pi}{2}$
Appuyée-Appuyée	3.1416	6.2832	9.4228	$n\pi$
Libre-Libre	4.7300	7.8532	10.996	$(2n+1)\frac{\pi}{2}$

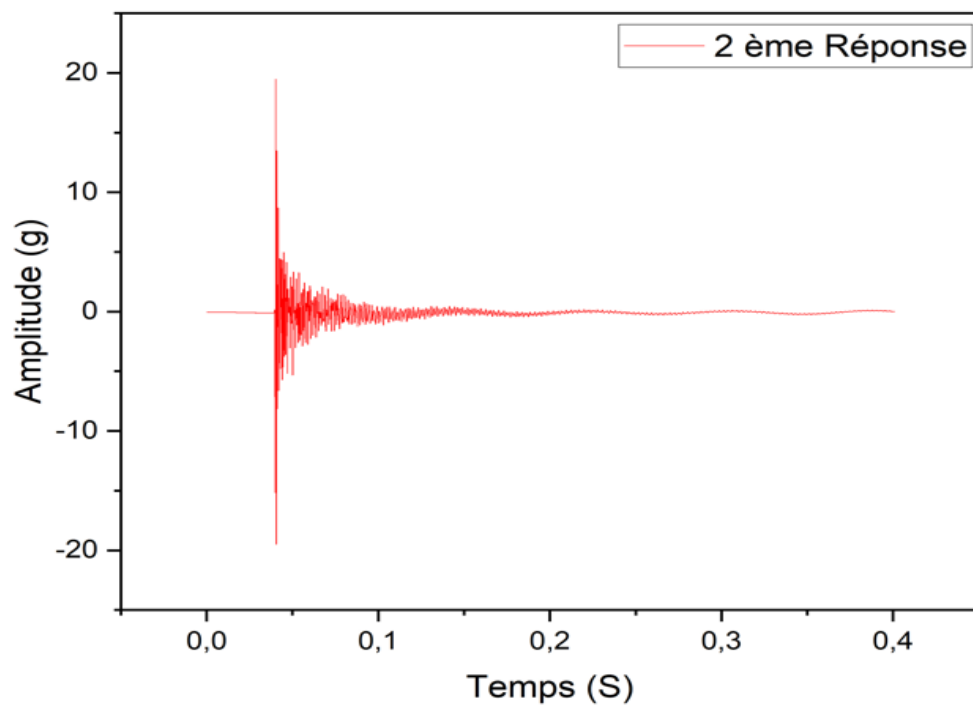
Tableau A.1 : Valeurs de β_n pour différentes conditions limites [8]

Annexe

Graphe d'excitation

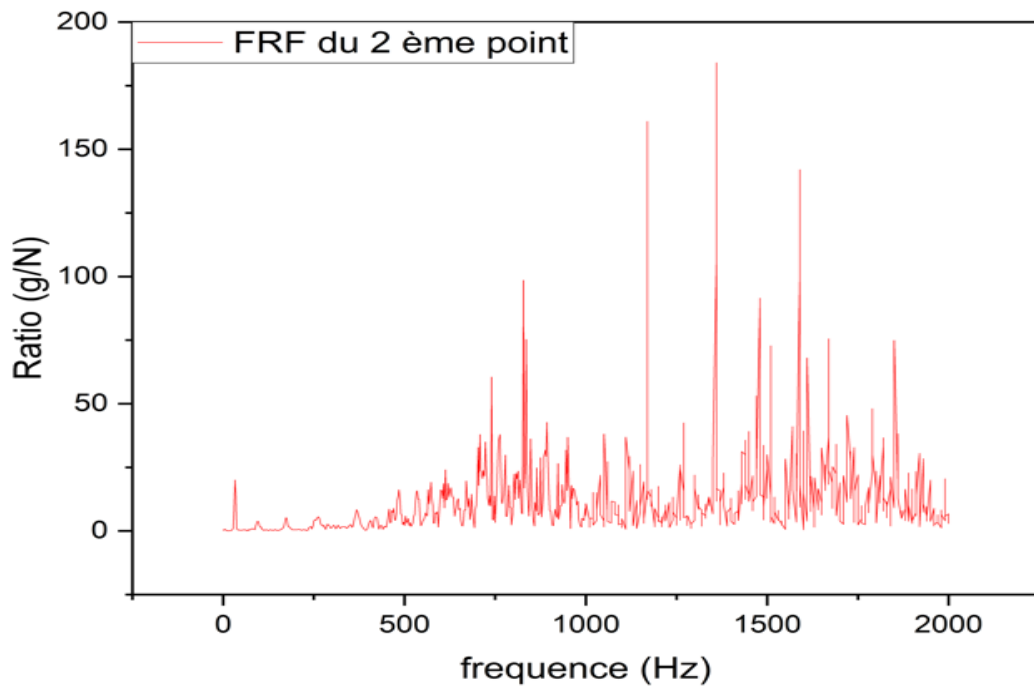
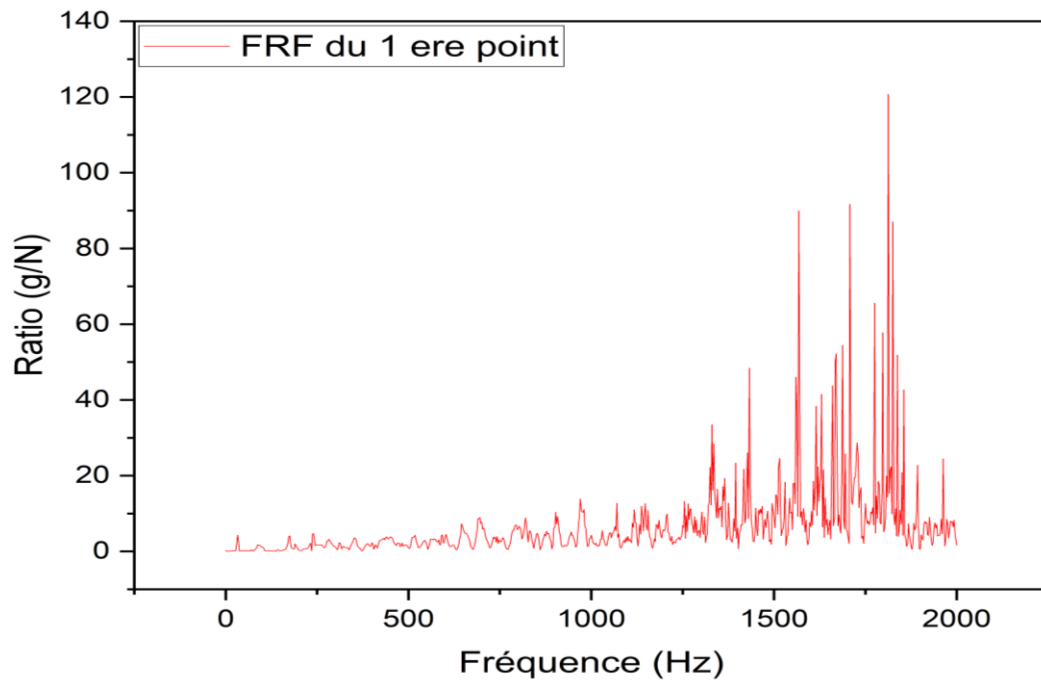


Graphe de réponse

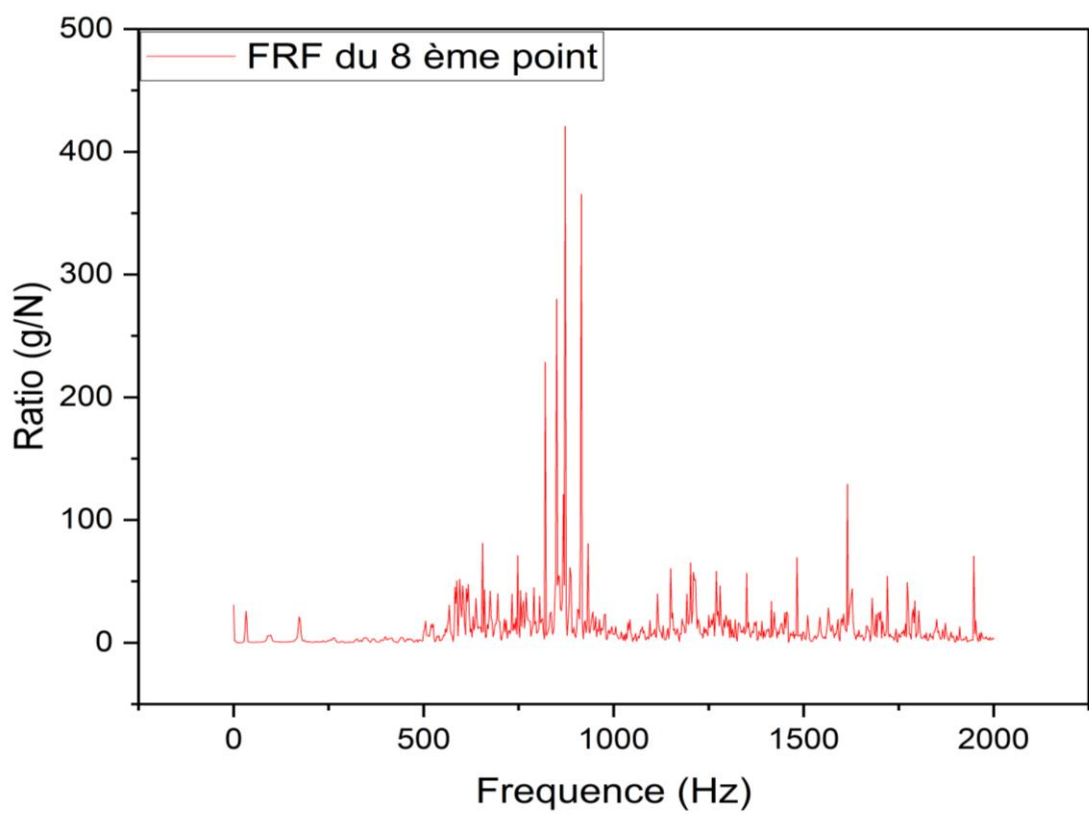
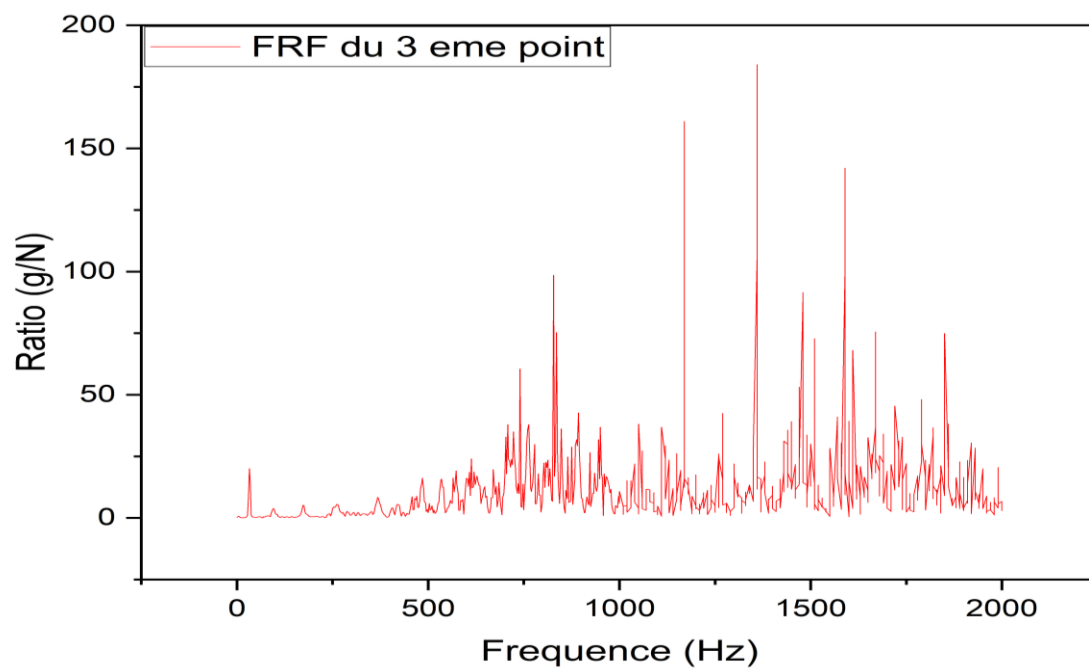


Annexe

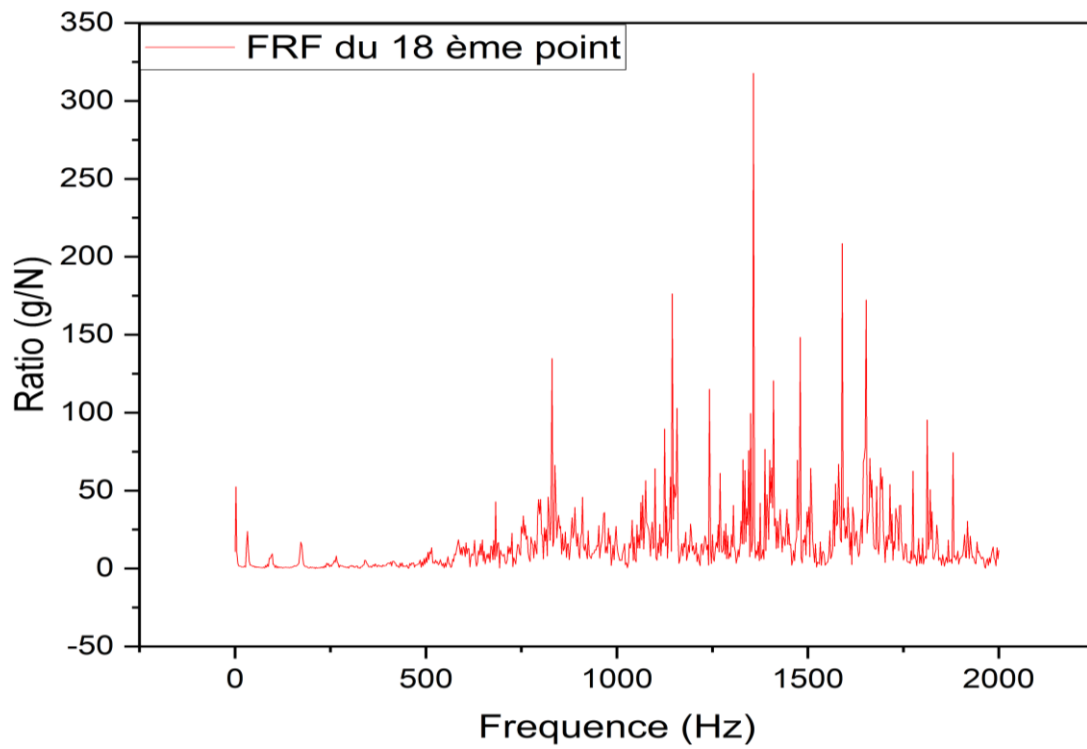
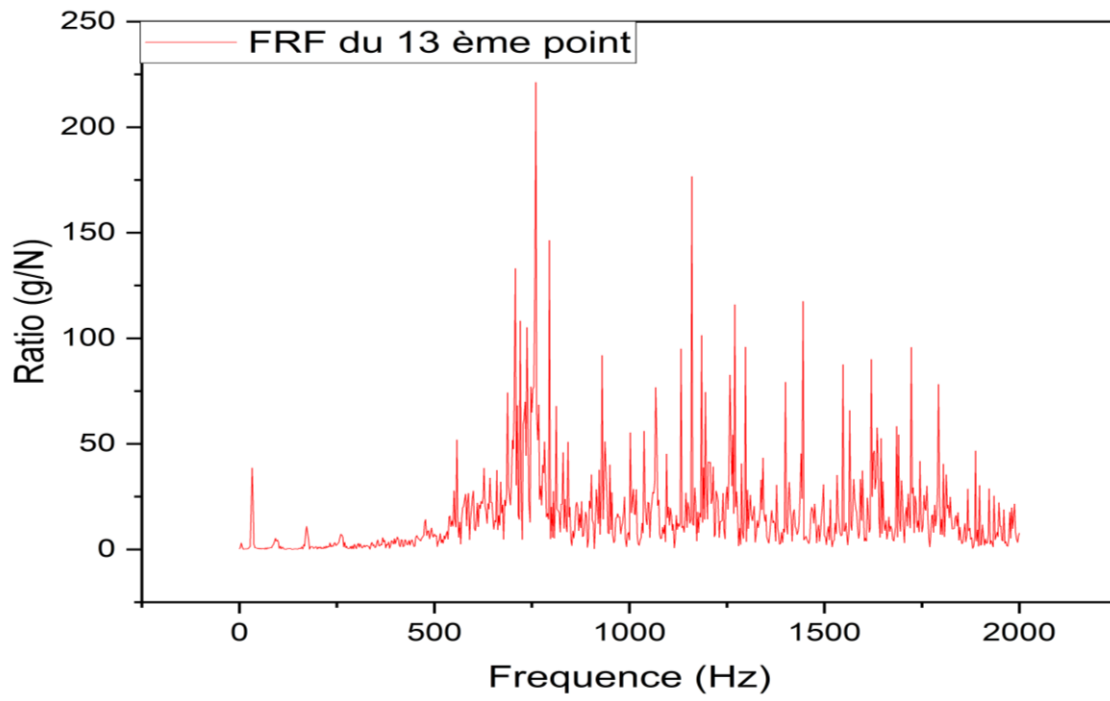
Graphes des FRFs



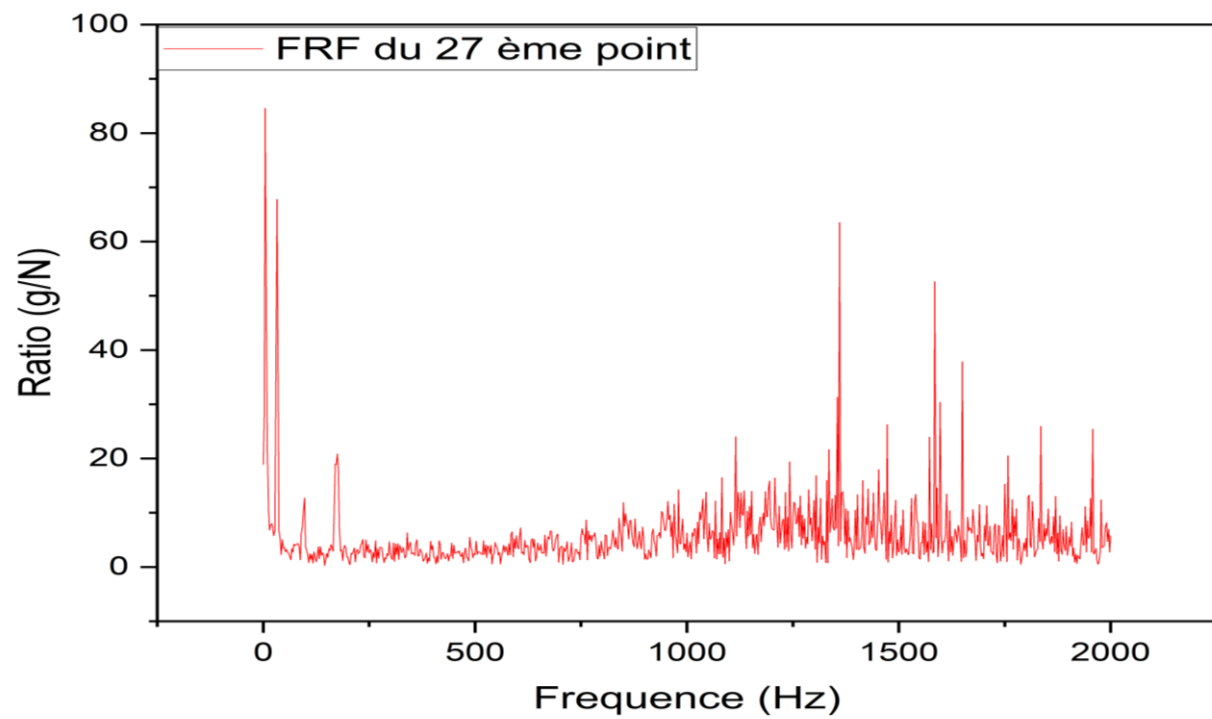
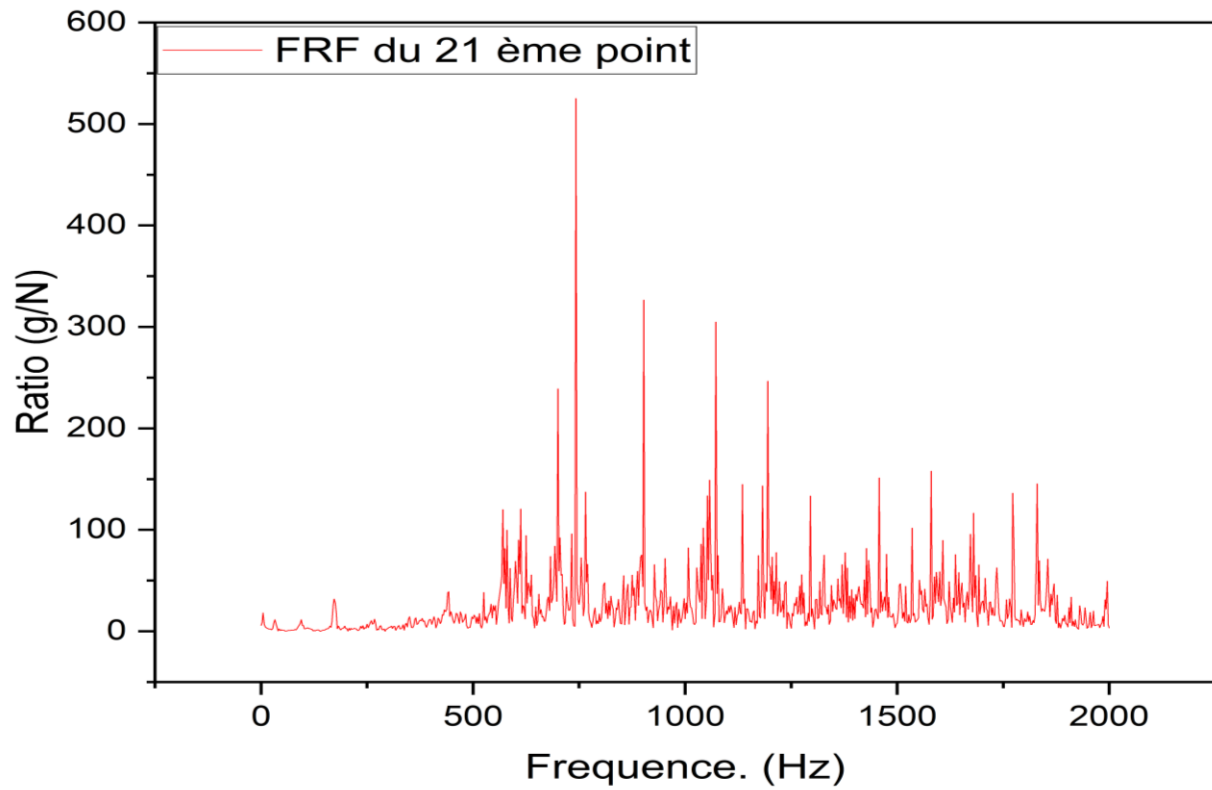
Annexe



Annexe



Annexe



BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Chapitre I

- [1] L. R. Newcome, "Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004", Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: https://books.google.co.in/books?id=HH_VZID81rkC
- [2] Mario LANDRY, "COMMANDE DE VOL NON-LINÉAIRE EN TEMPS RÉEL D'UN DRONE À VOILURE FIXE," Apr. 2012.
- [3] J. D. Anderson, "Fundamentals of Aerodynamics (Mcgraw Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering)," 2009.
- [4] "Brevet d'Initiation Aéronautique Aérodynamique et mécanique du vol AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DU VOL."

Chapitre II

- [1] E. J. , & C. J. H. Chikofsky, « Ingénierie inverse et récupération de conception : une taxonomie », 1990.
- [2] Chelli Imad Eddine et Boukhentef Abdelkrim, « Réalisation et conception d'un scanner 3D », 2023.
- [3] Creaform. (s.d.). HandySCAN 3D, « Scanner 3D portable professionnel ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible à: <https://www.creaform3d.com/fr/products/portable-3d-scanners/portable-3d-scanner-handyscan-3d>
- [4] Techniques de l'Ingénieur, « Matériaux composites à fibres de carbone – Propriétés et applications, [En ligne] », Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible à: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/composites-42777210/materiaux-composites-a-fibres-de-carbone-m7510/>
- [5] Techniques de l'Ingénieur, « Matériaux composites à fibres de verre – Caractéristiques et usages, [En ligne] », Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible à: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/composites-42777210/materiaux-composites-a-fibres-de-verre-m7515/>
- [6] K. DuPont, « Caractéristiques et applications, [En ligne]. », Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible à: <https://www.dupont.com/brands/kevlar.html>
- [7] DJEBLOUN Youcef, « ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES », 2003.
- [8] A. Bendjelid, « Étude du comportement mécanique des matériaux composites destinés à l'aéronautique (Mémoire de fin d'études). Université de Constantine », 2012. [En ligne]. Disponible à: https://www.memoireonline.com/11/22/13391/m_Etude-du-comportement-mecanique-des-materiaux-composites-destines--laeronautique7.html
- [9] DevCad, "DevFoam - CNC Foam Cutting Software," *DevCad.com*. [En ligne]. Disponible : <https://www.devcad.com/eng/devfoam3.asp>
- [10] Dassault Systèmes, "SOLIDWORKS – Logiciel de CAO 3D," *SolidWorks.com*. [En ligne]. Disponible : <https://www.solidworks.com/fr>.

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre III

- [1] BEDJAOUI Fatima Zahra and BOUKEZZOULA Assala Meriem, “Analyse Modale Du Banc Expérimental De La Partie Arrière De l’Hélicoptère Mil Mi-2,” 2023.
- [2] Sid Ali Zekagh and Abdelmadjid Mohammed, “exploration modale et simulation numérique dune demi ail de profil MH-60,” 2023.
- [3] J. Morlier and J. M. Methodes D’, “METHODES D’ANALYSE DES DEFORMEES MODALES PAR TRAITEMENT DU SIGNAL POUR LE DIAGNOSTIC IN SITU DE STRUCTURES.” [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00078449v1>
- [4] BOUCHAREB MOHAMED NACER, “Analyse modale d’une poutre encastré-libre,” 2016.
- [5] Mellal Nacim, “Identification des Dommages dans les Barres d’Acier en Employant des Indices Basés sur l’Analyse Modale Expérimentale et Numérique,” Blida Jun. 2010.
- [6] Dassault Systèmes, "SIMULIA Abaqus – Logiciel de simulation multiphysique," *3ds.com*. [En ligne]. Disponible : <https://www.3ds.com/fr/products/simulia/abaqus>.

Annexe

- [1]D.Gay, Matériaux composites 4e Edition revue et augmenter Hermes 1997 , ISBN : 2-86601-586-X
- [2] Dupuy, Jean Sébastien., “Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire ”, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France (2002).